

Uma Visão Geral do Sistema Solar

DESCOBRINDO O SISTEMA SOLAR

Desde os gregos:

- Sol
- 5 planetas:
 - Mercúrio
 - Vênus
 - Marte
 - Júpiter
 - Saturno
- Cometas (visíveis por algumas semanas)
 - Meteoros ou “estrelas cadentes”

(Adaptado do curso AGA0215 da **Profa. Thais Idiart**)

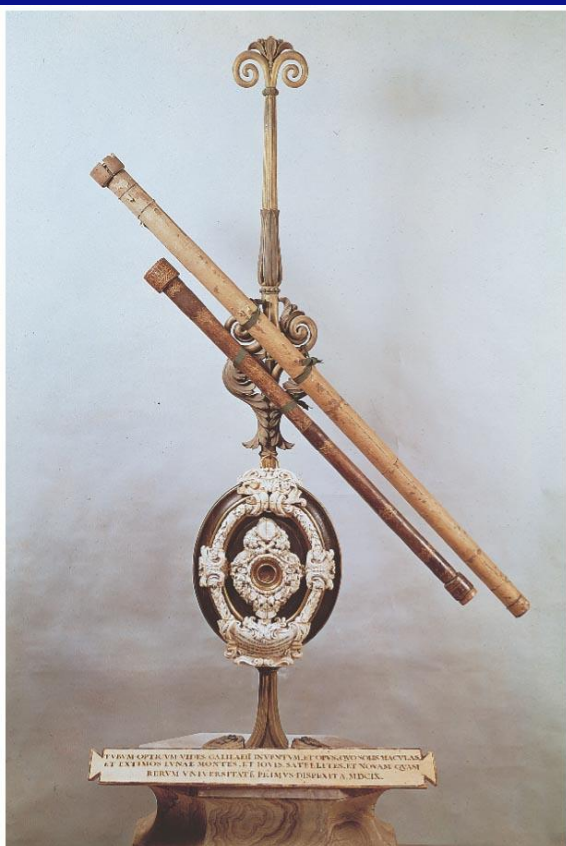
Uma Visão Geral do Sistema Solar

DESCOBRINDO O SISTEMA SOLAR

Mudança no começo do século XVII :

Telescópio refrator com objetiva de 51mm
(Galileo Galilei)

- Fases de Vênus
- 4 luas de Júpiter
- Anéis de Saturno



Uma Visão Geral do Sistema Solar

DESCOBRINDO O SISTEMA SOLAR

Até o final do século XIX:

Descoberta dos planetas:

- Urano (1781)
- Netuno (1846)

+ descobertas:

- Luas de outros planetas
- Primeiros asteróides
cinturão de asteróides
(entre Marte e Júpiter)
Ceres (1801)

Telescópio Newtoniano de 72" (1,8m) (metade do século XIX)

Uma Visão Geral do Sistema Solar

DESCOBRINDO O SISTEMA SOLAR

Século XX :

Crescimento tecnológico dos telescópio ópticos

- **+ centenas de asteróides**
- **Anéis em outros planetas**
- **+ dezenas de luas**
- **Objetos do cinturão de Kuiper**
órbita além de Netuno

Observações em rádio e IR

Explorações espaciais
Lua e Marte (in loco)

Uma Visão Geral do Sistema Solar

EXPLORAÇÕES A LUA

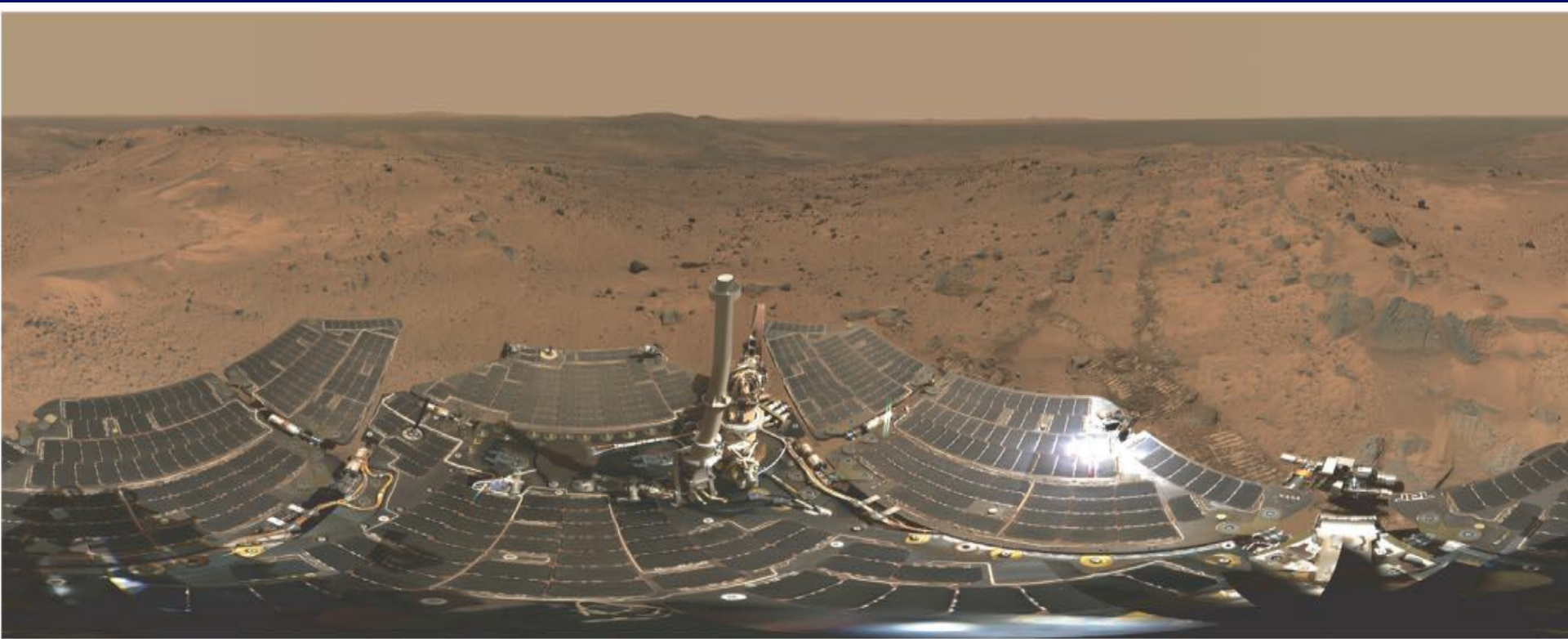


Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley.

Astronauta da Apollo (geologia da Lua - 1972)

Uma Visão Geral do Sistema Solar

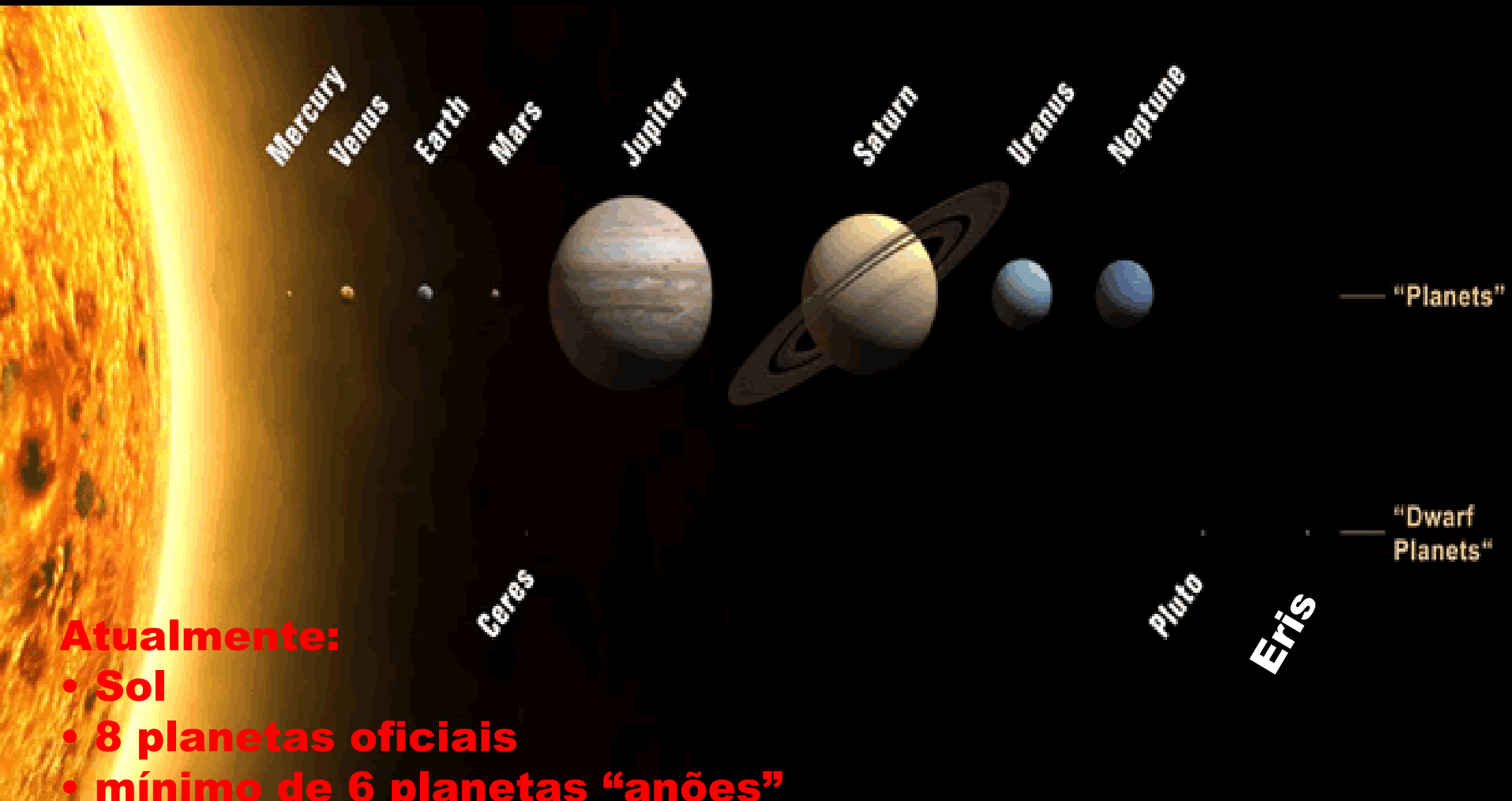
EXPLORAÇÕES A MARTE



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley.

Missão Spirit (janeiro 2004) : visão de 360° de Marte, mineralogia e composição química.

Uma Visão Geral do Sistema Solar



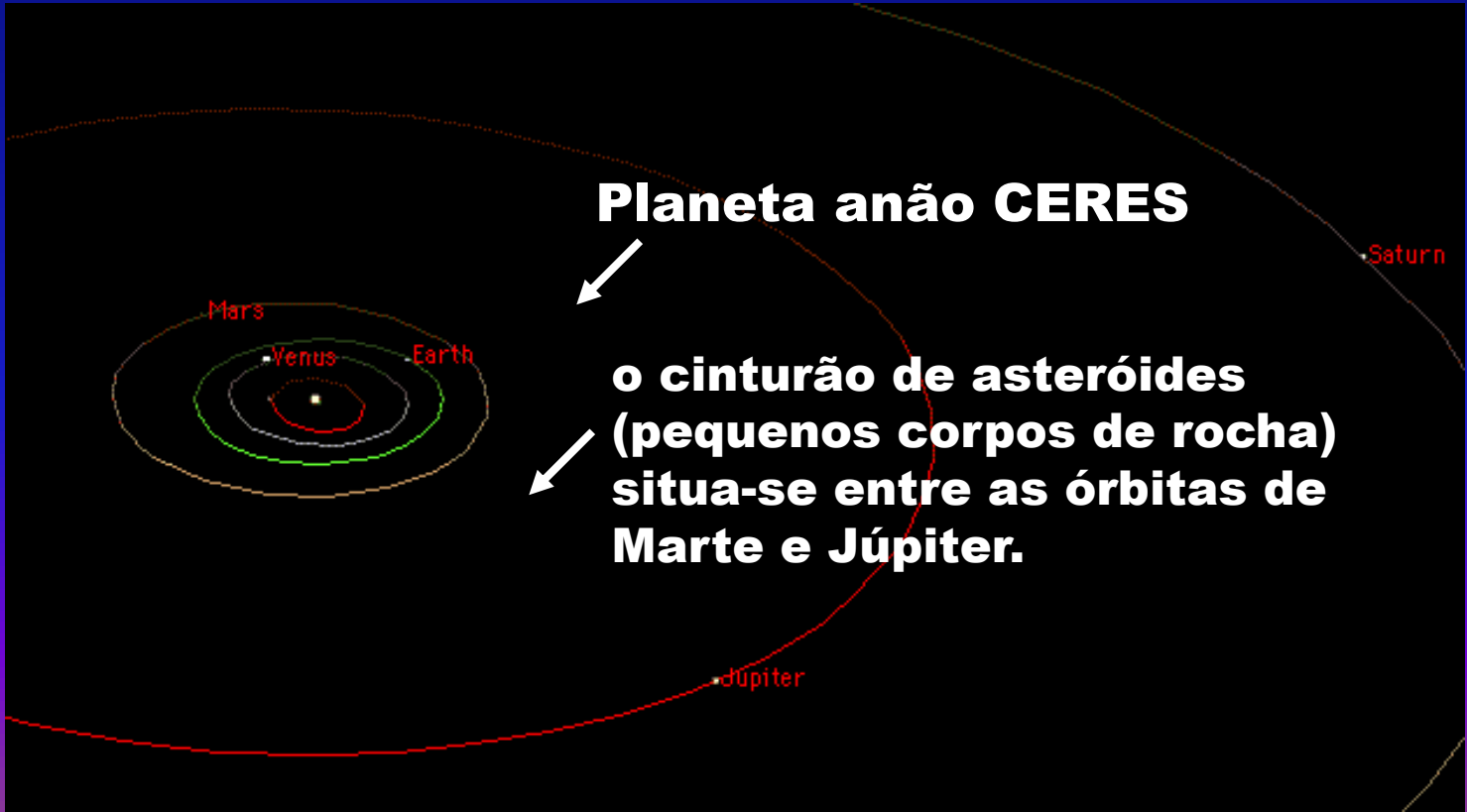
Atualmente:

- Sol
- 8 planetas oficiais
- mínimo de 6 planetas "anões"
- ~ 166 satélites pertencentes aos planetas
- um grande número de pequenos corpos
(cometas, asteróides e objetos do cinturão de Kuiper)
- meio interplanetário

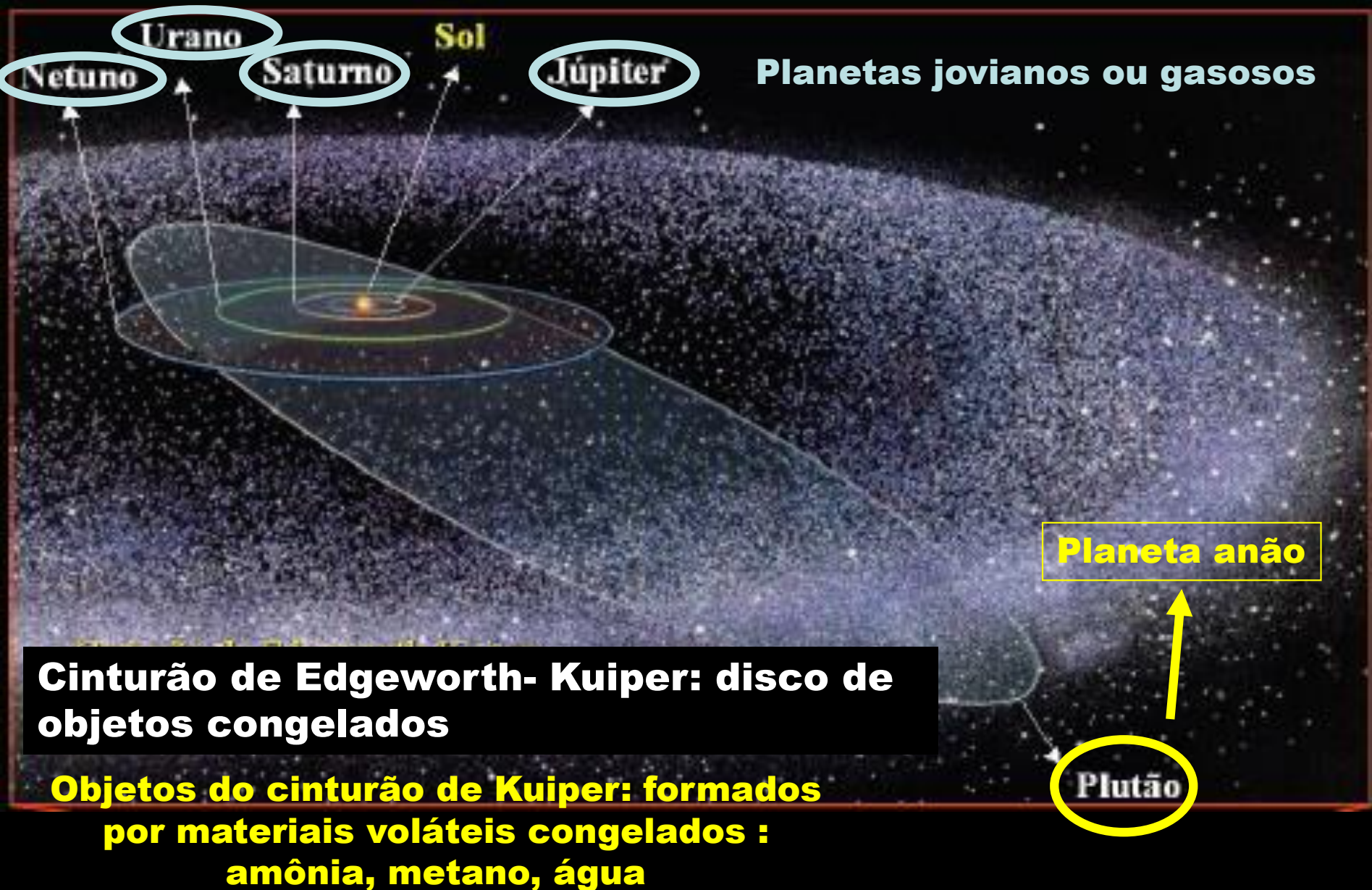
Sistema solar interno

- Sol
- Mercúrio
- Vênus
- Terra
- Marte

} **Planetas telúricos ou rochosos**



Sistema solar externo



Reconnaissance at the Farthest Frontier

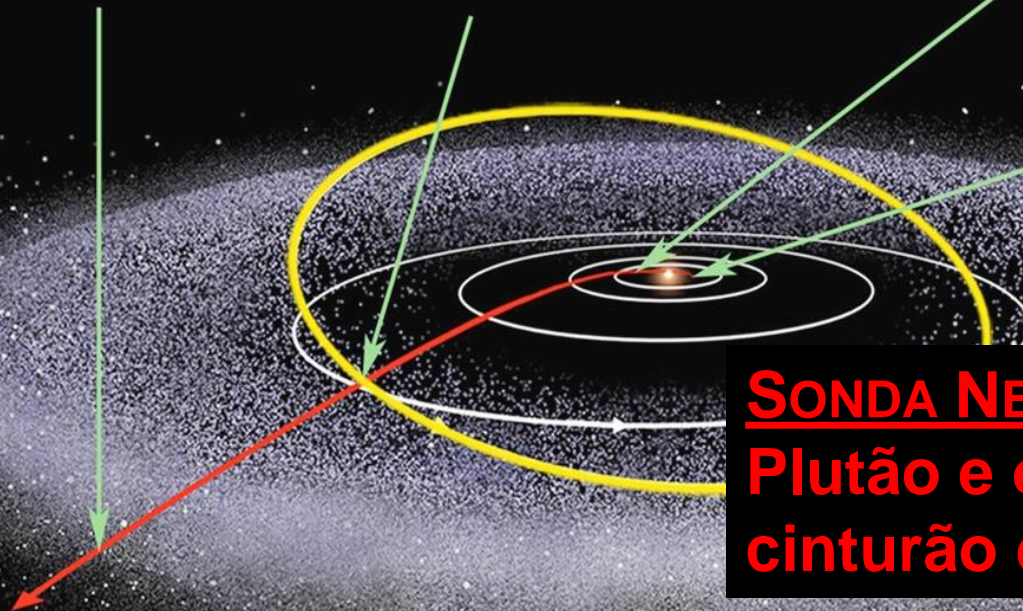
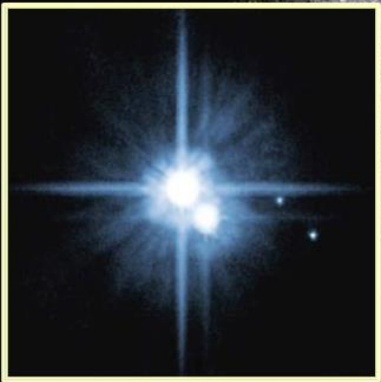
KBOs
2016–2020

Pluto System
July 2015

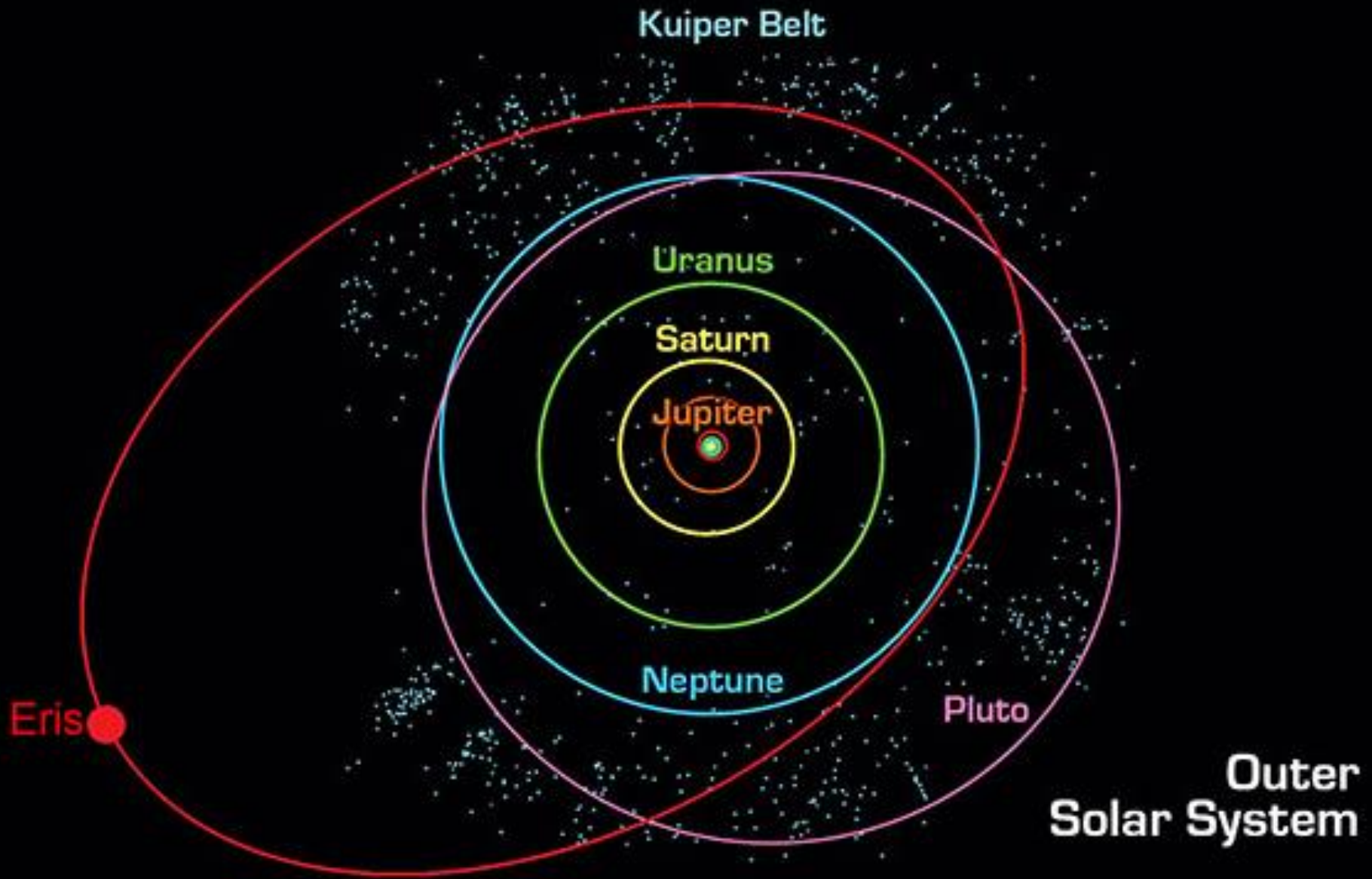
Jupiter System
Feb 2007

Launch
Jan 2006

SONDA NEW HORIZONS
Plutão e objetos do
cinturão de Kuiper



- Cinturão de Kuiper: região com formato de disco que se estende desde 30 a 55 UA do Sol (objetos trans-netunianos)
- Populado por centenas de milhares de corpos congelados > 100 km e trilhões de cometas (períodos \leq 200 anos)
- Remanescente da formação do sistema solar (4,6 bilhões de anos atrás)



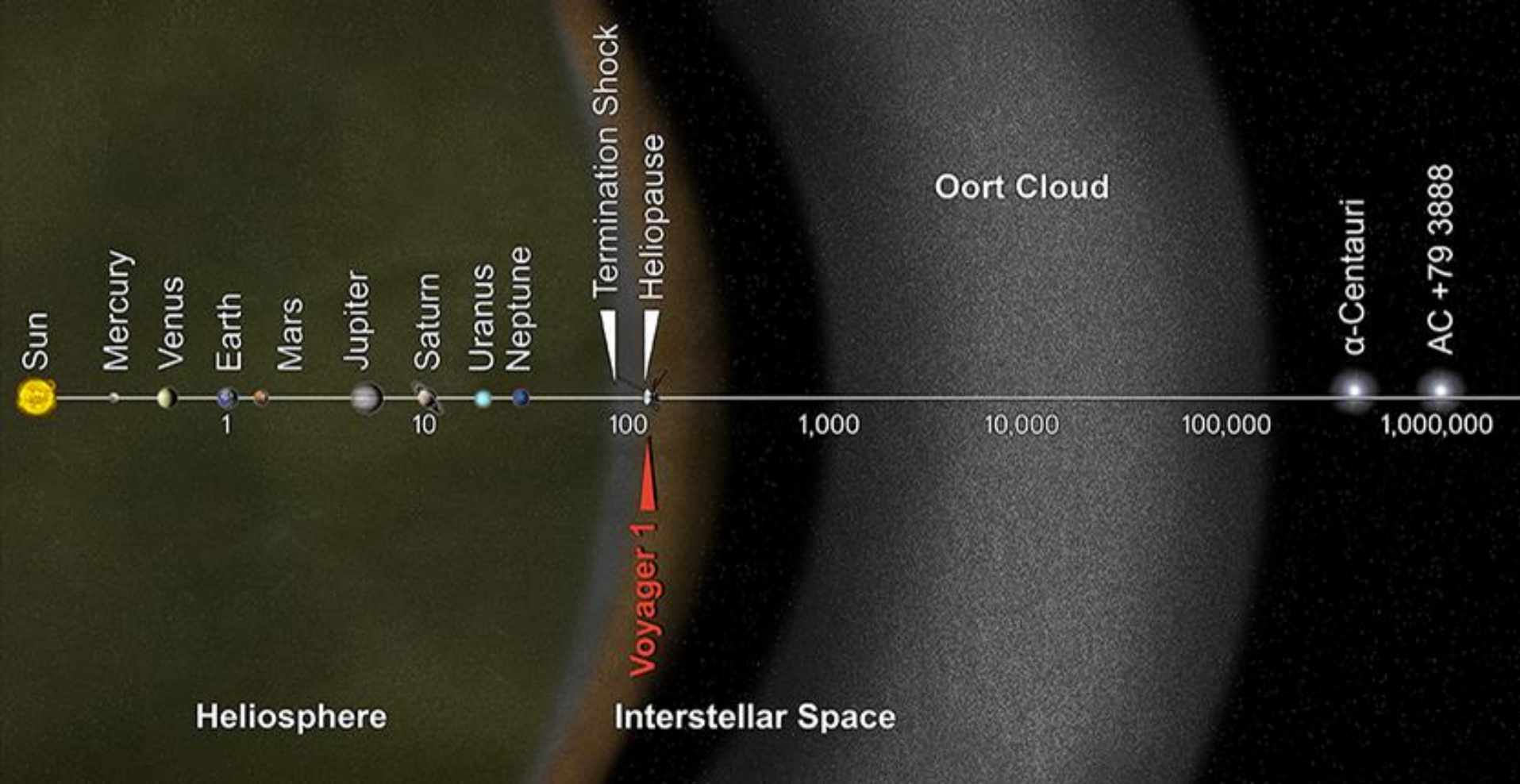
Eris e Plutão: maiores e mais massivos objetos do cinturão de Kuiper

NUVEM DE OORT



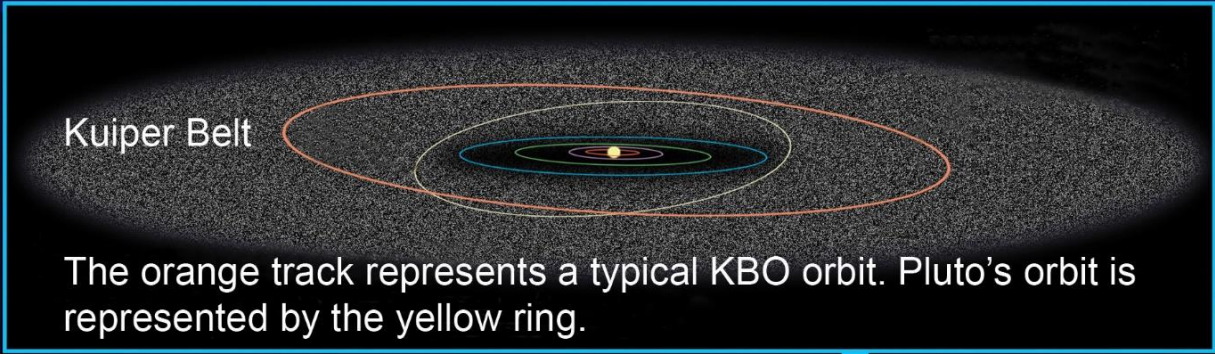
propôs a existência da nuvem como origem dos cometas que orbitam o sol com um período de milhares de anos (1950)

- **Nuvem espessa (bolha) formada por debris congelados**
- **Região pode se estender até 50.000 a 100.000 UA do Sol (~1/3 da distância Sol-Alfa Centauri ⇒ limite do sistema solar**



- Voyager 1 (lançada em setembro/1977) só alcançará a nuvem ao redor de ~ 300 anos
- Estimado: trilhões de corpos congelados
- Exemplo de cometas: ISON (destruído pela passagem muito próxima ao Sol) e Siding Spring (passou próximo a Marte, retorno em 740.000 anos).

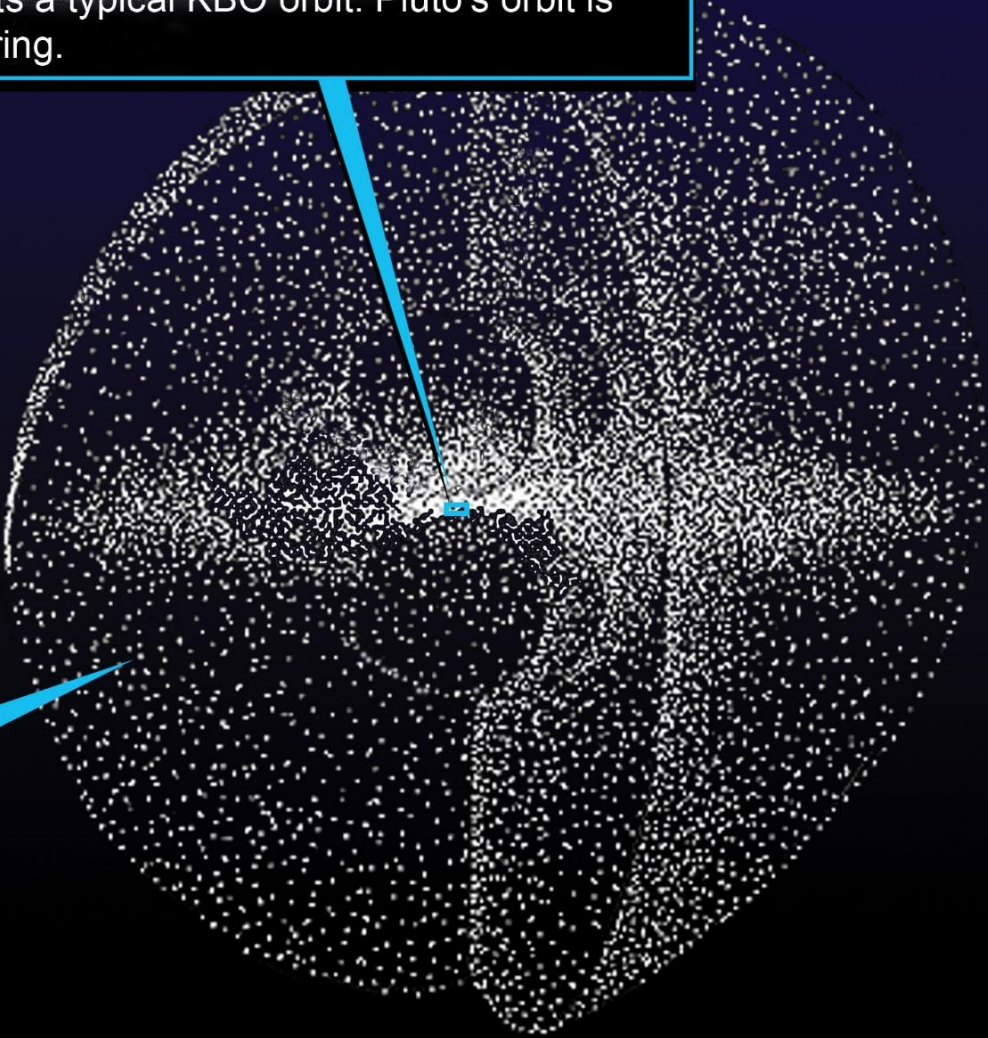
NUVEM DE OORT: nuvem de cometas e planetóides



EXTENSÃO DO SISTEMA SOLAR : 50.000 a 100.000 UA

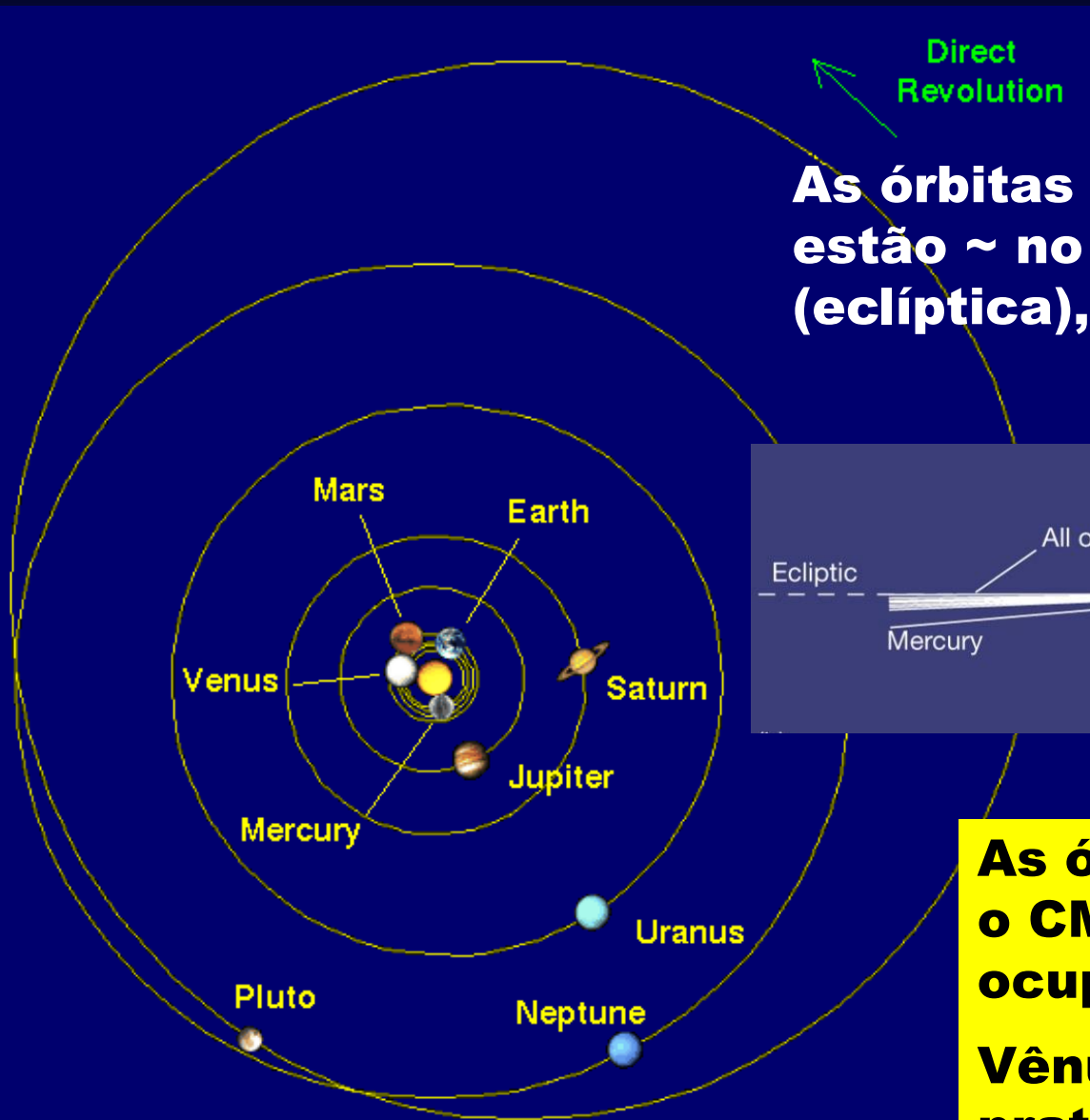
Oort Cloud

This text is enclosed in a blue-bordered box. A blue line points from this box to the Oort Cloud region in the main diagram.

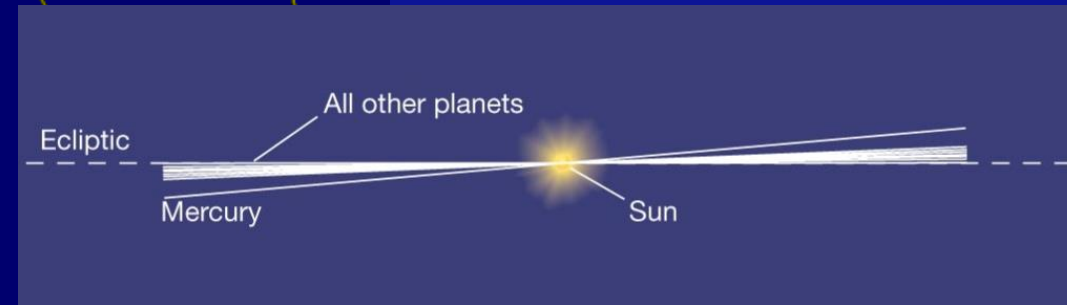


PLANETAS PRINCIPAIS

Os planetas giram ao redor do sol no sentido anti-horário (com o pólo norte solar visto de cima).



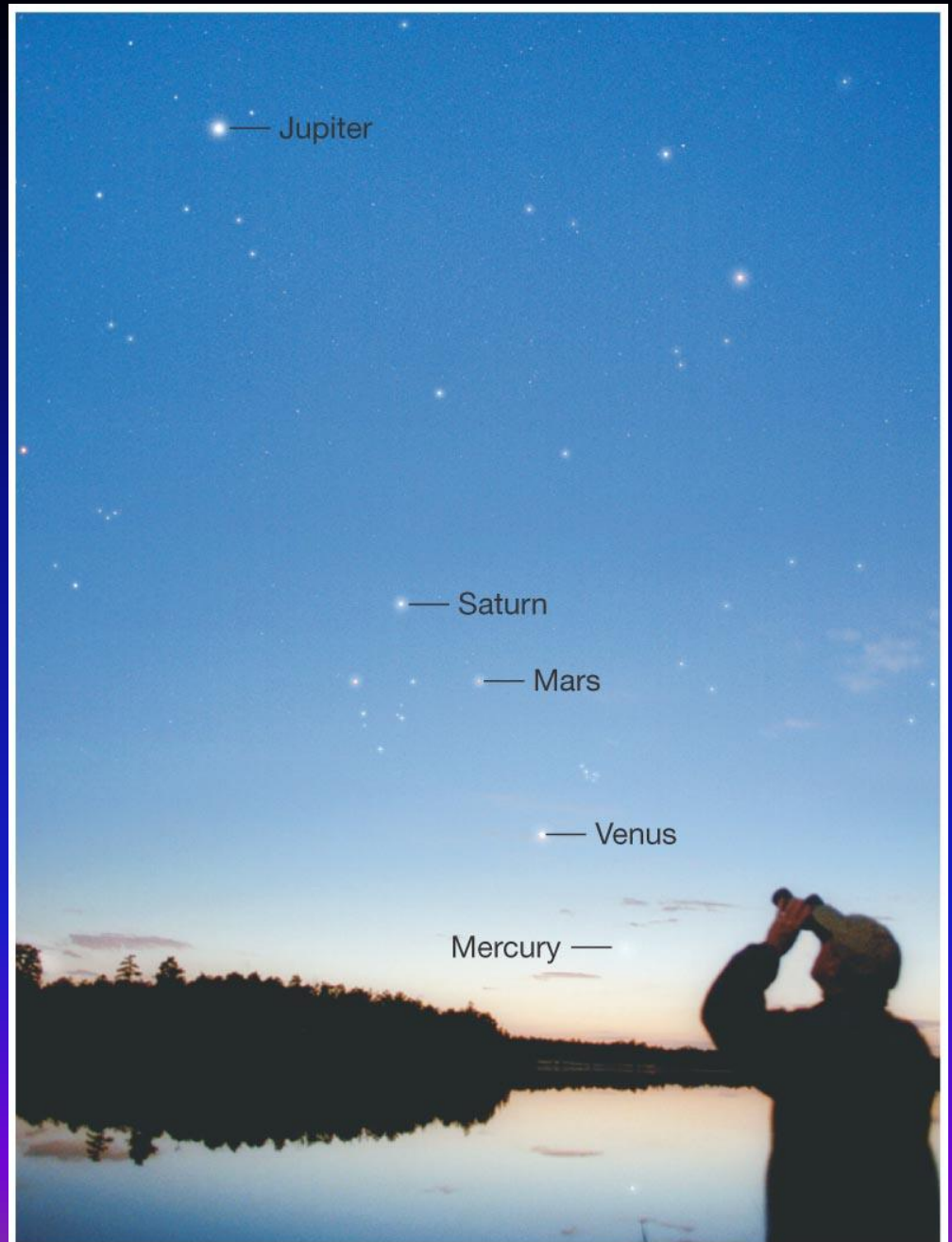
As órbitas dos planetas principais estão ~ no mesmo plano (eclíptica), exceto Mercúrio.



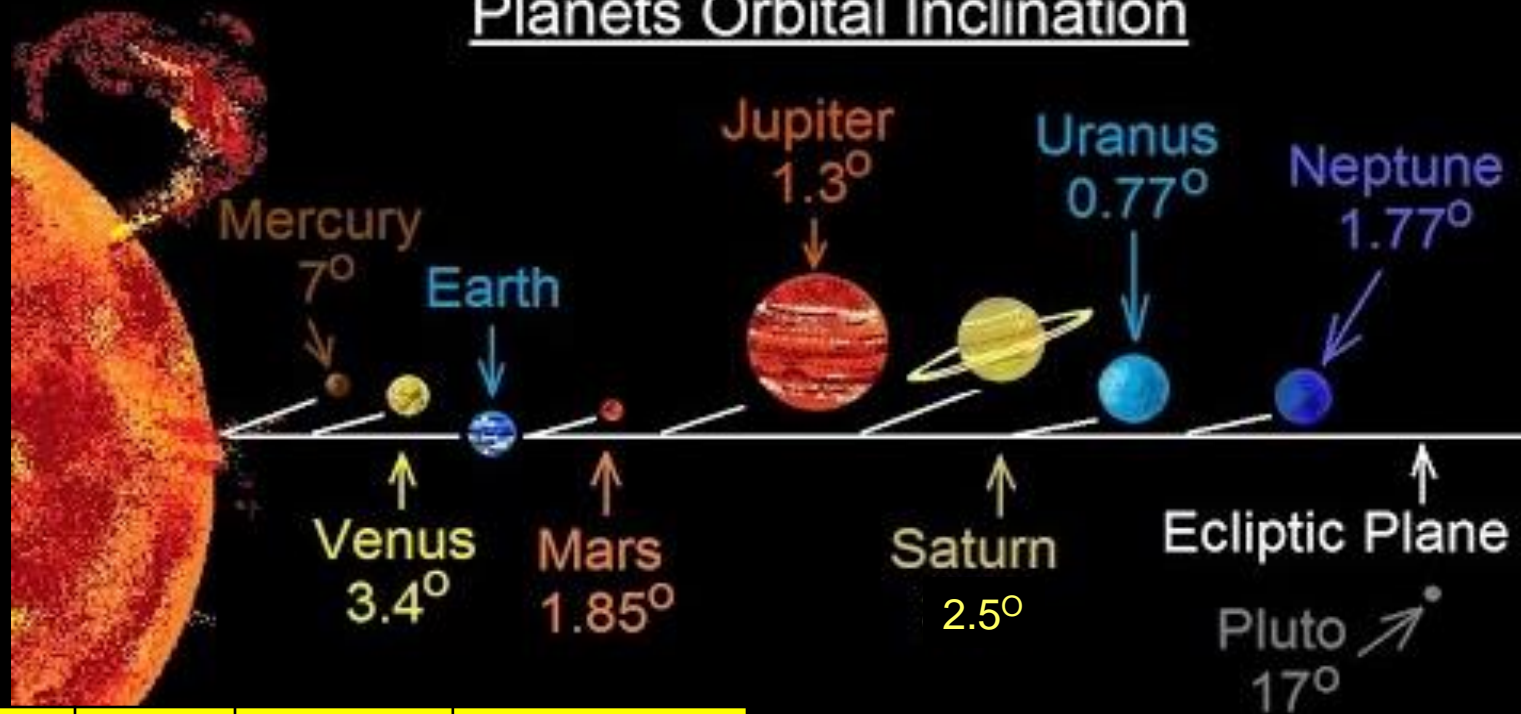
As órbitas são elipses com o CM do sistema solar ocupando um dos focos.

Vênus, Terra e Netuno são praticamente circulares

Devido a órbita dos planetas estarem aproximadamente no mesmo plano, é possível observá-los da Terra praticamente em linha reta em algumas situações.



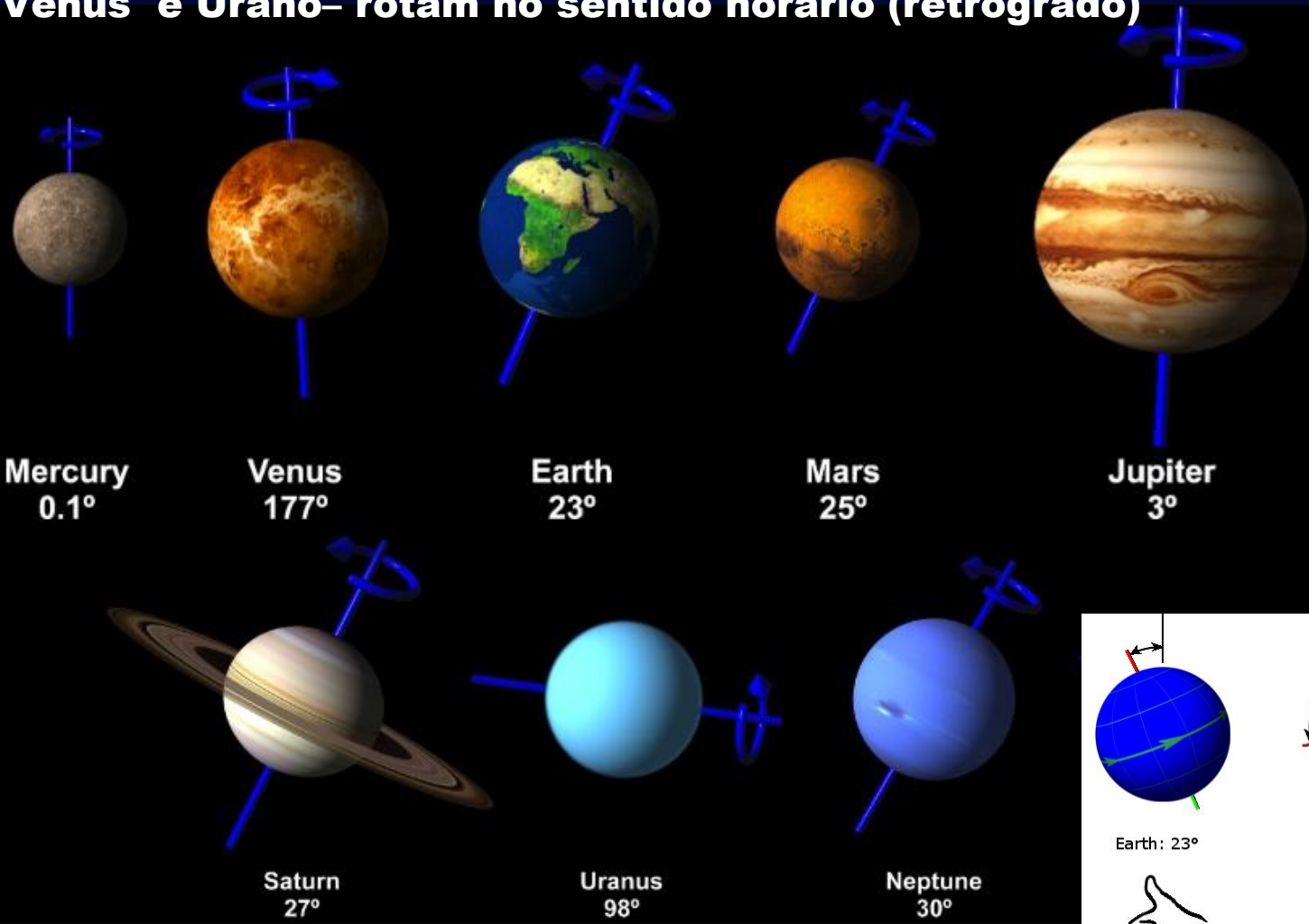
Planets Orbital Inclination



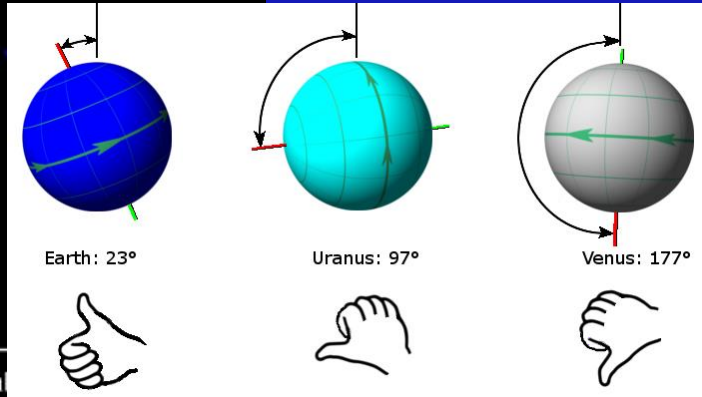
	a(UA)	Exc. Orb.	Incl. Orb.
Sol	0	---	---
Mercúrio	0,39	0,2056	7°
Vênus	0,72	0,0068	3,394°
Terra	1	0,0167	0
Marte	1,5	0,0934	1,850°
Júpiter	5,2	0,0483	1,308°
Saturno	9,5	0,0560	2,488°
Urano	19,2	0,0461	0,774°
Netuno	30,1	0,0097	1,774°

Exceto Vênus e Urano, todos os planetas principais giram ao redor do seu próprio eixo no sentido anti-horário (em relação ao norte da eclíptica).

Vênus e Urano – rotam no sentido horário (retrógrado)



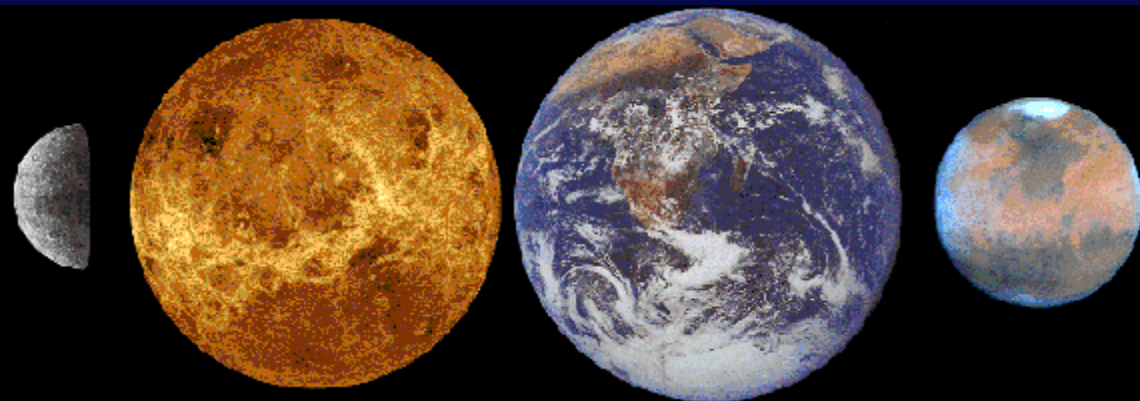
	Eixo de Rot.
Mercúrio	0,1°
Vênus	177,4°
Terra	23,45°
Marte	25,19°
Júpiter	3,12°
Saturno	26,73°
Urano	97,86°
Netuno	29,56°



Obliquity of the Nine Planets

© Copyright 1999 by Ca

TAMANHOS RELATIVOS



	Raio (Terra)
Sol	109
Mercúrio	0,38
Vênus	0,95
Terra	1
Marte	0,53
Júpiter	11
Saturno	9
Urano	4
Netuno	4

	a (UA)	R (R _⊕)	M (M _⊕)	Rot (dias ⊕)	n^o Lua s	Incl. Orb.	Exc. Orb.	P orb. (anos ⊕)	Eixo rot.	Dens. g/cm³
Sol	0	109	332.800	25-36*	---	---	---	---	---	1,410
Mercúrio	0,39	0,38	0,05	59	0	7°	0,206	0,24	0,1°	5,4
Vênus	0,72	0,95	0,89	-243**	0	3,39°	0,007	0,62	177,4°	5,2
Terra	1	1	1	1	1	0	0,017	1	23,45°	5,5
Lua	---	0,27	0,012	27,3	---	---	---	---	5,2°	3,3
Marte	1,5	0,53	0,11	1,03	2	1,85°	0,093	1,9	25,19°	3,9
Ceres (cinturão)	2,8	0,073	0,00015	0,38	---	---	---	4,7	---	2,7
Júpiter	5,2	11	318	0,41	63	1,31°	0,048	11,9	3,12°	1,3
Saturno	9,5	9	95	0,44	56	2,488°	0,056	29,4	26,73°	0,7
Urano	19,2	4	17	-0,72**	27	0,77°	0,046	84	97,86°	1,3
Neptuno	30.1	4	17	0,67	13	1,77°	0,010	164	29,56°	1,6
Plutão (Kuiper)	39,5	0,18	0,002	-6,4	3	17,1°	0,248	248	119,6°	2,1
Hale-Bopp (cometa)	180	0,004	10⁻⁹	0,47	---			2400		0,1

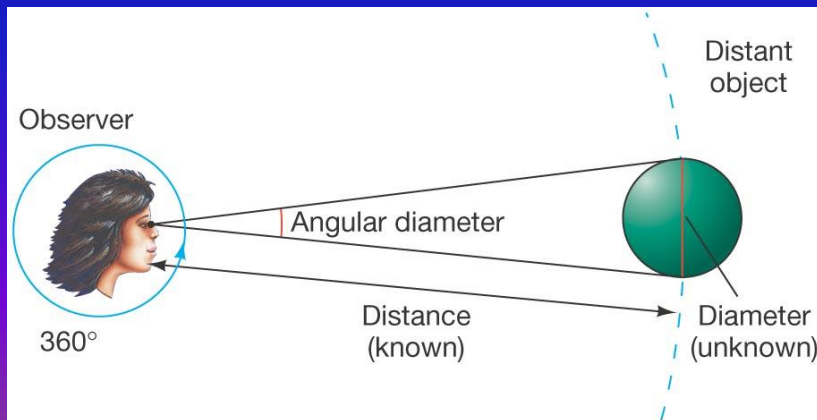
*** O período de rotação do Sol na sua superfície varia de aproximadamente 25 dias no equador até 36 dias nos pólos.**

**** período de rotação negativo = rotação retrógrada**

MEDINDO OS PLANETAS

- ✓ **DISTÂNCIA AO SOL** : escalas dadas pelas leis de Kepler
Distâncias reais do sistema solar calculadas por radar ou por trânsito.
- ✓ **PERÍODO SIDERAL ORBITAL**: observações das posições dos planetas com o tempo.
- ✓ **RAIO DO PLANETA**: diâmetro angular

Ex. Diâmetro angular de Júpiter = 46,8 segundos de arco



$$\frac{\text{diâmetro}}{2\pi \times \text{distância}} = \frac{\text{diâmetro angular}}{360^\circ}$$

Diâmetro = 143.000 km

MEDINDO OS PLANETAS

- ✓ **MASSA** : leis de Newton (movimento e gravidade) ou 3ª lei de Kepler ⇒ observando o movimento das luas em torno do planeta

Ex. estimativa da massa Júpiter : o período observado de Europa em torno de Júpiter é de 3,55 dias. A órbita é ~ circular com um raio angular de 3,66' (visto da Terra).

Convertendo em km :

$$\frac{\text{raio orbital}(\text{Europa} - \text{Júpiter})}{2\pi \times \text{distância}(\text{Terra} - \text{Júpiter})} = \frac{\text{diâmetro angular orbital}}{360^\circ}$$

Raio orbital de Europa ~ 671.000 km

Velocidade Orbital de Europa:

$$V = \frac{2\pi r}{P} = 13,7 \text{ km / s}$$

MEDINDO OS PLANETAS

- ✓ **MASSA** : leis de Newton (movimento e gravidade) ou 3ª lei de Kepler \Rightarrow observando o movimento das luas em torno do planeta

Raio orbital de Europa ~ 671.000 km

Vel. Orbital de Europa: 13,7 km/s

- ❖ **Aplicando as leis de Newton:**

$$\frac{mV^2}{r} = \frac{GmM}{r^2} \Rightarrow M = \frac{rV^2}{G}$$

$$M_J = 1,9 \times 10^{27} \text{ kg}$$

- ❖ **Aplicando a 3ª lei de Kepler:**

$$(M_J + m) = \frac{a^3}{P^2}$$

Sendo $M_J \gg m$

$$M_J(M_\odot) = \frac{a^3(\text{UA})}{P^2(\text{anos})}$$

$$M_J = \left(\frac{671.000}{150 \times 10^6} \right)^3 / \left(\frac{3,55}{365} \right)^2 = 0,0009 M_\odot \\ \sim 1,9 \times 10^{27} \text{ kg}$$

MEDINDO OS PLANETAS

- **MASSA DE PLANETAS SEM SATÉLITES:** através de perturbações nas órbitas de objetos próximos (estimativa do potencial gravitacional).

Ex.

Mercúrio e Vênus produzem perturbações nas órbitas um do outro assim como na órbita da Terra.

Lua produz perturbação da órbita da Terra (como dois corpos orbitando em torno de seu CM).

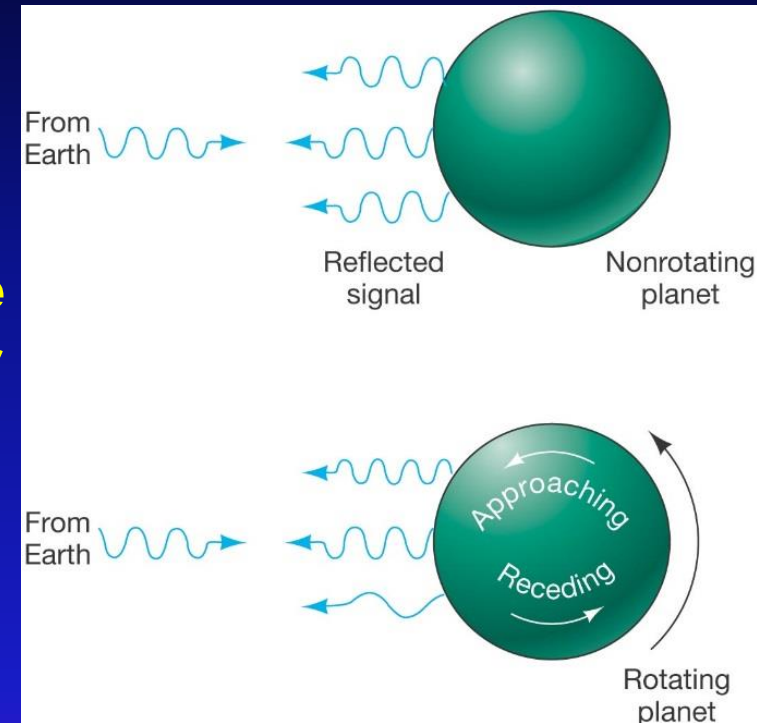
Descoberta de Netuno: perturbações na órbita de Urano

**** Hoje em dia: massas podem ser medidas + precisamente através da interação gravitacional com satélites artificiais.**

MEDINDO OS PLANETAS

- **PERÍODO DE ROTAÇÃO:** observações diretas do movimento de algum elemento na superfície.

No entanto alguns planetas são de difícil observação ⇒ efeito doppler
Ex. Mercúrio e Vênus



- **DENSIDADE MÉDIA:**

$$D = \frac{M}{\frac{4}{3} \pi R^3}$$

Ex. Júpiter $D=1240 \text{ kg/m}^3$ ou $1,24 \text{ g/cm}^3$

CLASSIFICAÇÃO DOS 8 PLANETAS DO SISTEMA SOLAR

Por **COMPOSIÇÃO QUÍMICA** :

- **Planetas terrestres ou rochosos** : Mercúrio, Vênus, Terra e Marte



são compostos por rochas e metal, possuindo altas densidades relativas, rotação + lenta, superfícies sólidas, sem anéis e poucas luas ou nenhuma.

- **Planetas jovianos ou gasosos** : Júpiter, Saturno, Urano e Netuno



são compostos por H e He, possuem baixas densidades, rotação rápida, camadas atmosféricas espessas, anéis e muitos satélites

CLASSIFICAÇÃO DOS 8 PLANETAS DO SISTEMA SOLAR

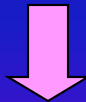
Por TAMANHO:

- **Planetas pequenos** : Mercúrio, Vênus, Terra e Marte



possuem diâmetros < 13.000 km

- **Planetas gigantes ou gigantes gasosos** : Júpiter, Saturno, Urano e Netuno



possuem diâmetros > 48.000 km

CLASSIFICAÇÃO DOS 8 PLANETAS DO SISTEMA SOLAR

Pela sua POSIÇÃO RELATIVA AO SOL:

- **Planetas internos** : Mercúrio, Vênus, Terra e Marte
- **Planetas externos** : Júpiter, Saturno, Urano e Netuno

O cinturão de asteróides situado entre Marte e Júpiter marca os limites do sistema solar interno e externo

CLASSIFICAÇÃO DOS 8 PLANETAS DO SISTEMA SOLAR

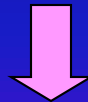
Pela sua **POSIÇÃO RELATIVA A TERRA:**

- **Planetas inferiores** : Mercúrio e Vênus



- + perto do Sol do que da Terra
- mostram fases do tipo da Lua quando vistos da Terra

- **Planetas superiores** : Marte, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno



- + perto da Terra do que do Sol
- os planetas superiores sempre aparecem na “fase cheia”

PLANETAS ANÕES

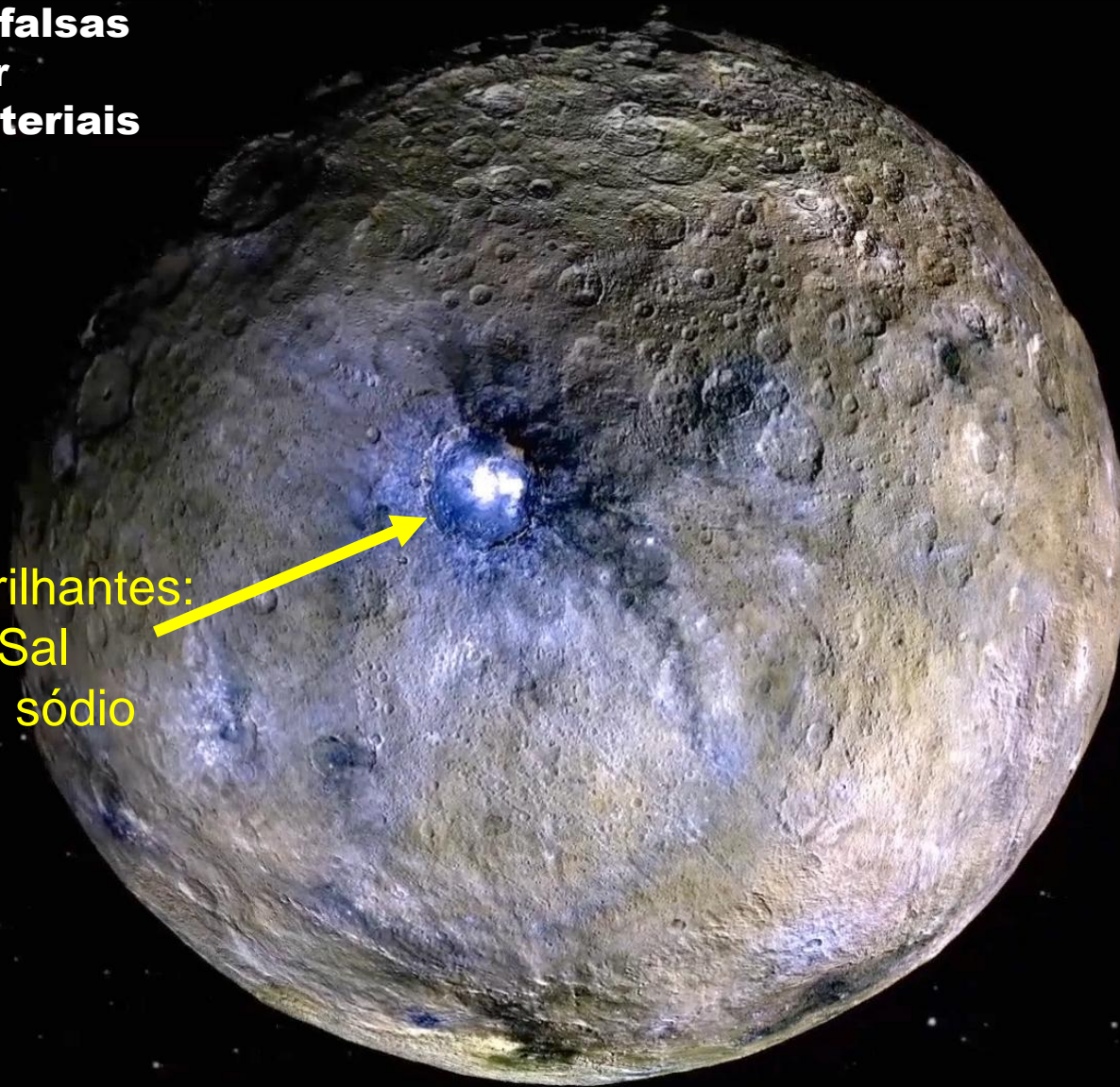
CERES : cinturão de asteroides

Sonda Dawn : março de 2015

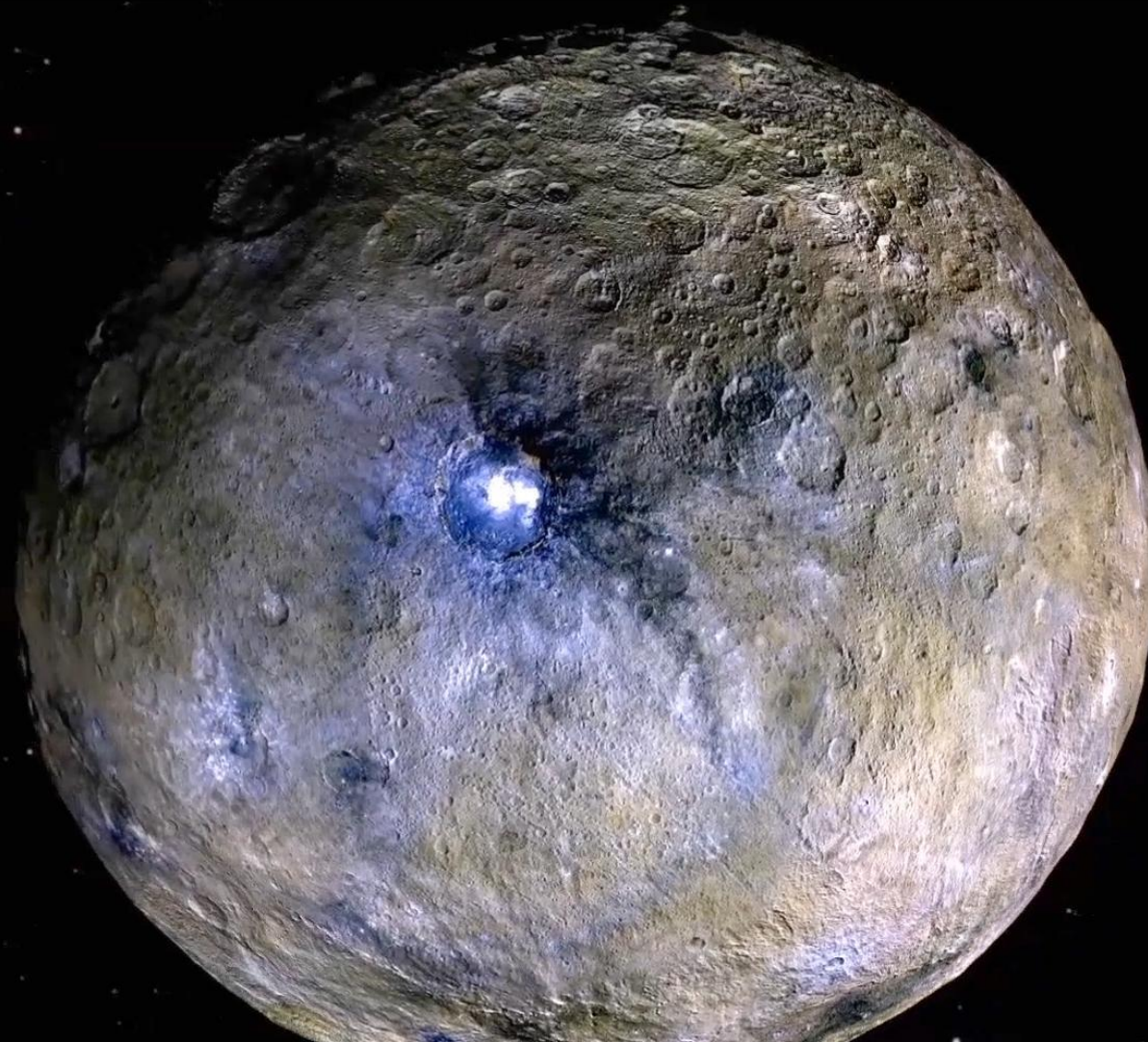


**Figura: cores falsas
para assinalar
diferentes materiais**

Superfícies brilhantes:
depósitos de Sal
Carbonato de sódio
 Na_2CO_3



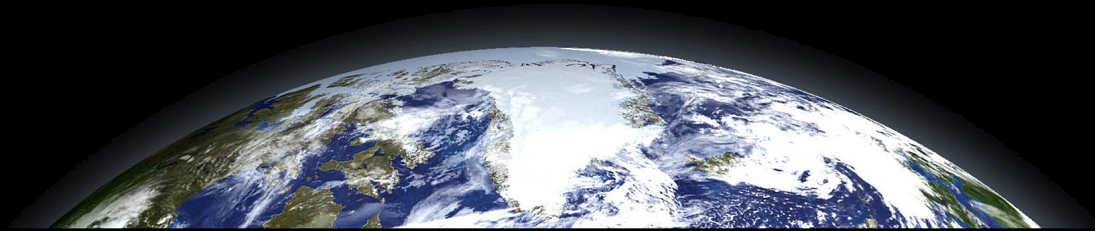
- **25% da massa total de todo o cinturão de asteroides**
- **14% menos massivo do que Plutão**



Nome	Distância do Sol (UA)	Região do Sistema Solar	Raio (Terra)	Orbita (anos terrestres)	Rotação (horas)
Ceres	2,77	Cinturão de asteroides	1/13	4,6	9

PLANETAS ANÕES – Kuiper/Oort

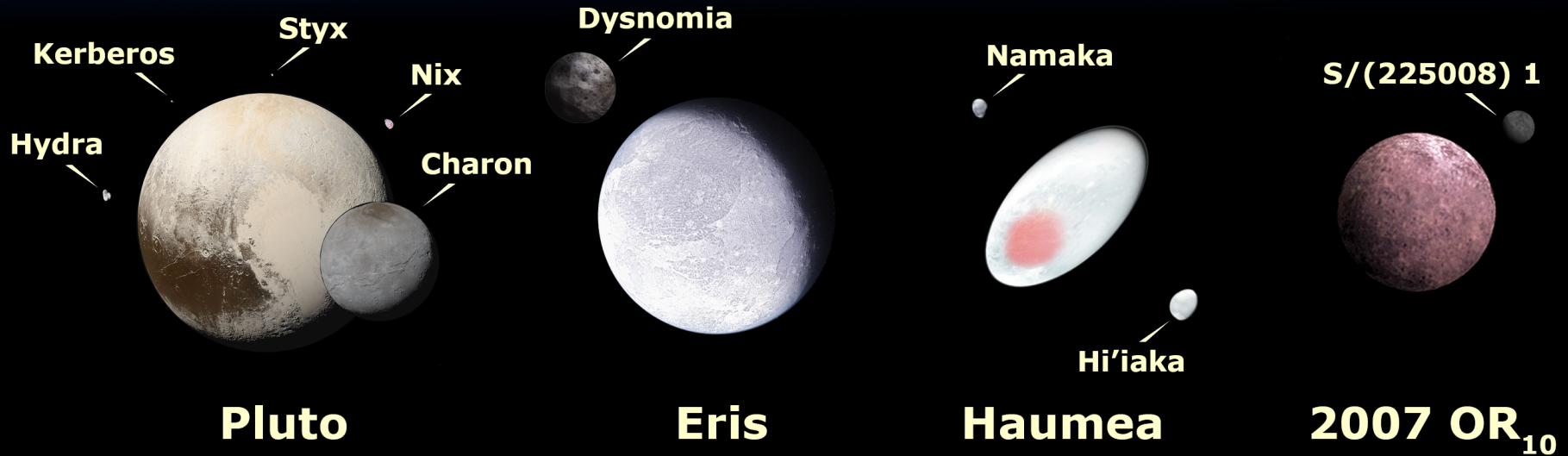
Largest known trans-Neptunian objects (TNOs)



2000 km



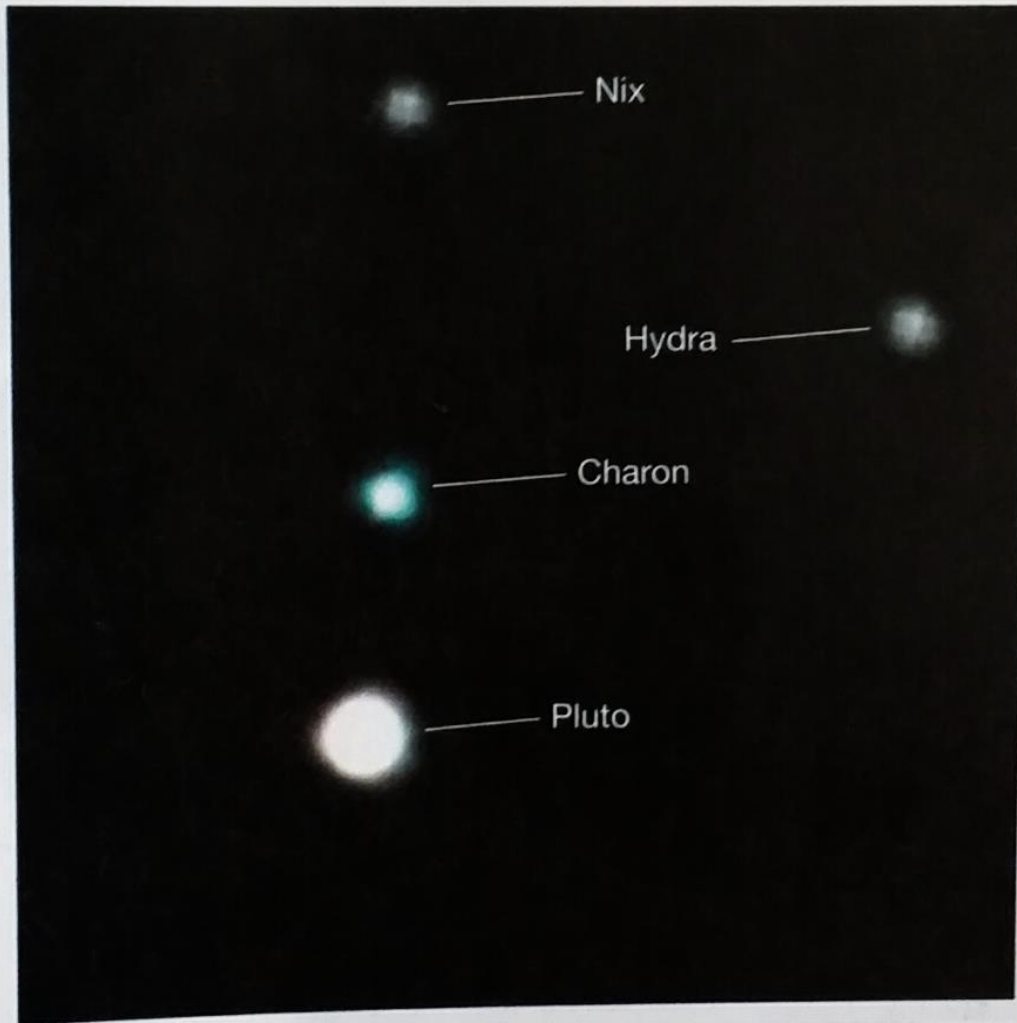
Largest known trans-Neptunian objects (TNOs)



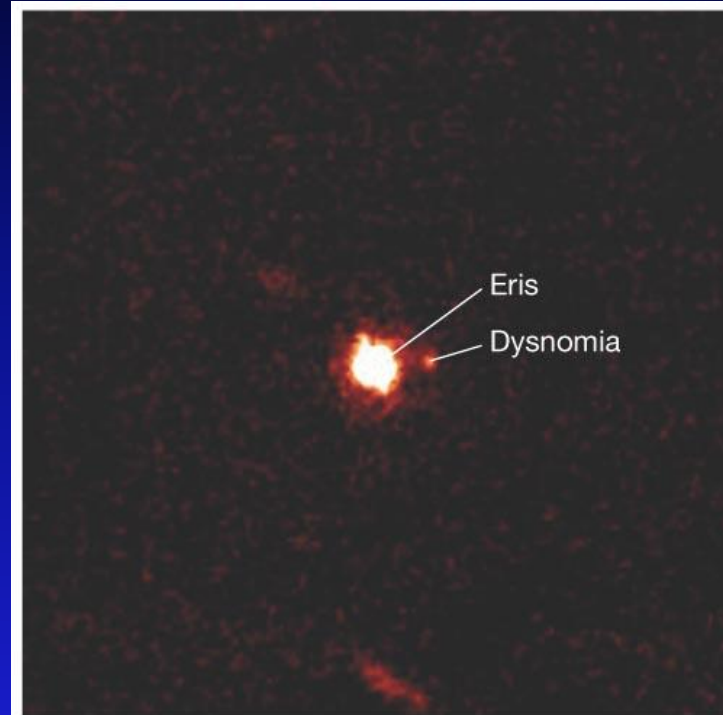
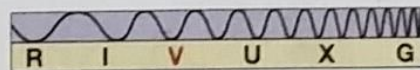
Nome	Distância do Sol (UA)	Região do Sistema Solar	Tamanho (Lua=3746km)	Massa (Lua)	Densidade (g/cm ³)
Ceres	2,77	Cint. de asteroides	(1/4) Lua	1,3%	2,7
Plutão	39,48	Cint. De Kuiper	68% da Lua	17,8%	2,1
Eris	67,67	Disco disperso	69% da Lua	22,7%	2,5
Haumea	43,22	Cint. de Kuiper	1.920 × 1.540 × 990 km	5%	2,9
Makemake	45,72	Cint. de Kuiper	40%	5,4%	2,3
Sedna	506,8	Entre Kuipper-Oort	(1/4) Lua	???	???

Ma

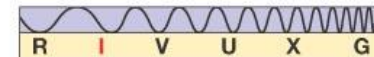




(b) **HST**



(b) **Keck**



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley.

Pluto's moons

Hydra
59 x 35 km



Kerberos
Diameter = 30 km



Nix
57 X 27 km



Charon
Diameter = 1207 km



Styx
Diameter = 7 km?



PLANETAS ANÕES



Dysnomia

Eris

Mars

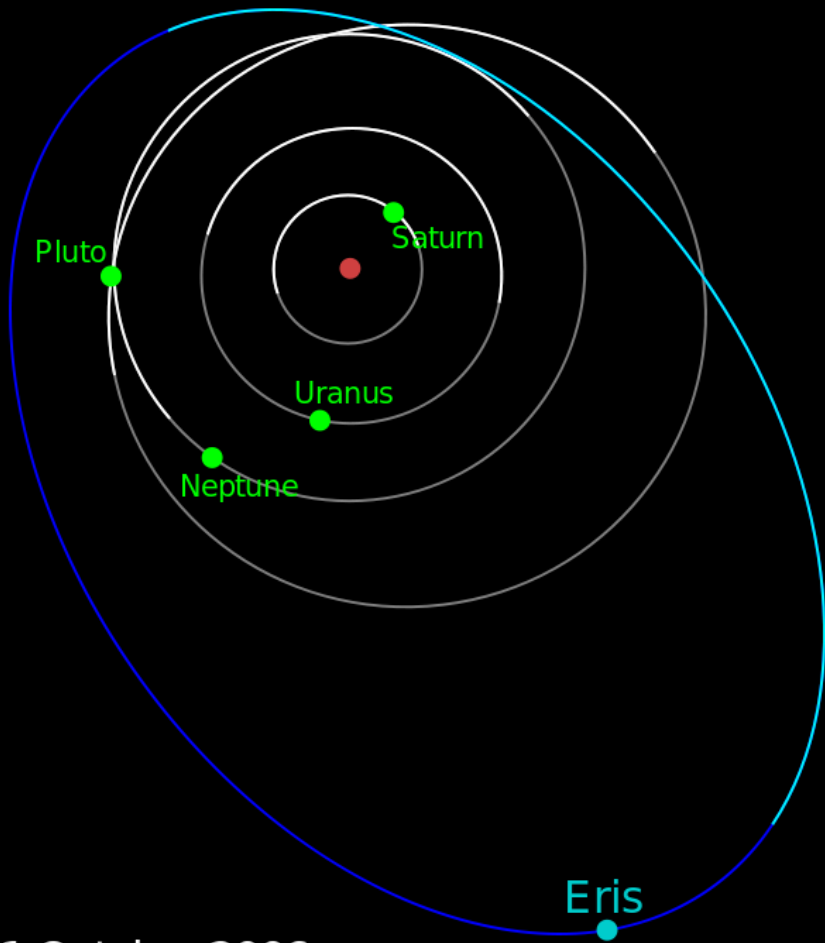
Ceres

Charon

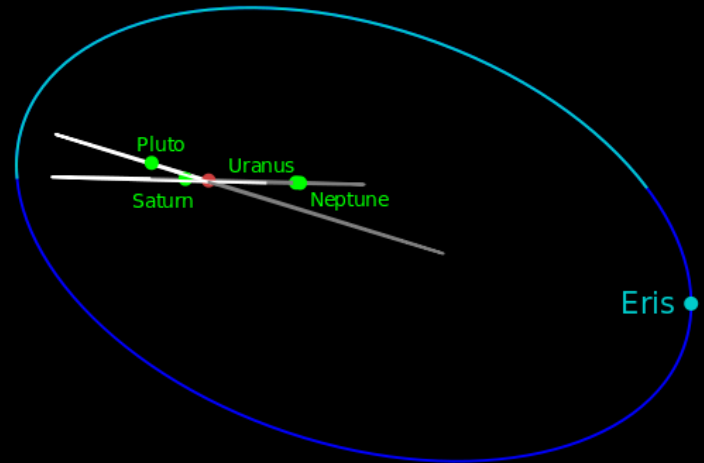
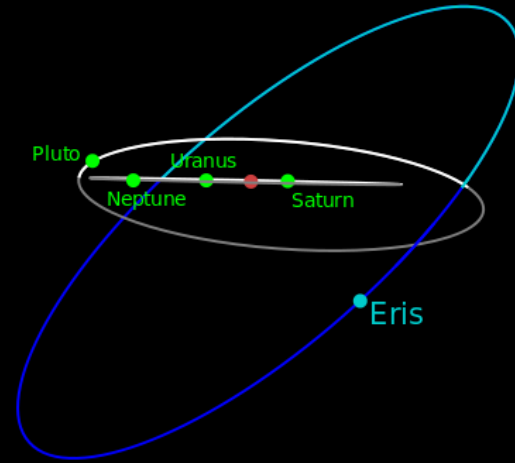
Earth

Luna

Pluto



11 October 2006



Orbit of Eris

(136199 Eris)

Perihelion: 37.77 AU
 Aphelion: 97.56 AU

Orbital period: 557 years

Eccentricity: 0.44
 Inclination: 44°

PLANETAS ANÕES

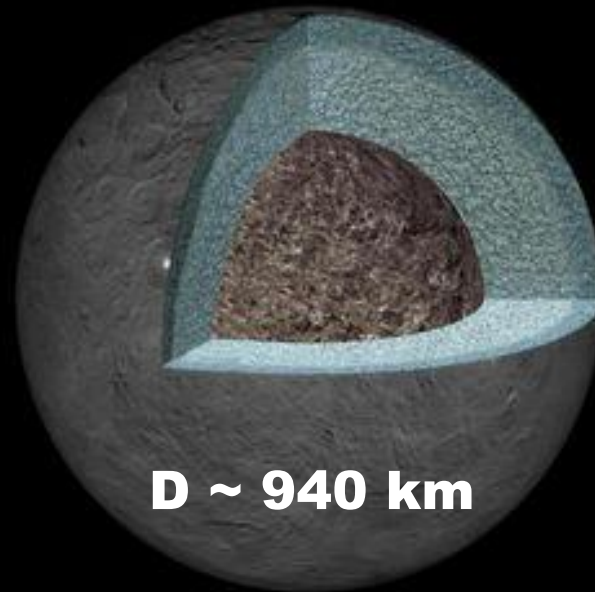
Ceres é um planeta anão que se encontra no cinturão de asteróides, entre Marte e Júpiter.

25% de gelo



Composição parecida com planetas terrestres

COMPOSIÇÃO QUÍMICA



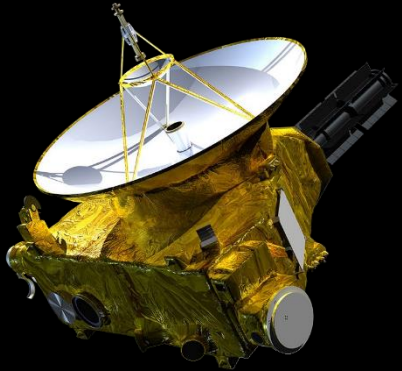
- **Núcleo sólido: silicatos hidratados Si-H**
- **Manto : água congelada (25%) e materiais mais voláteis**
- **Camada atmosférica fina : evidência de vapor d'água**
- **Potencial de vida : bactérias**
- **Sem luas**

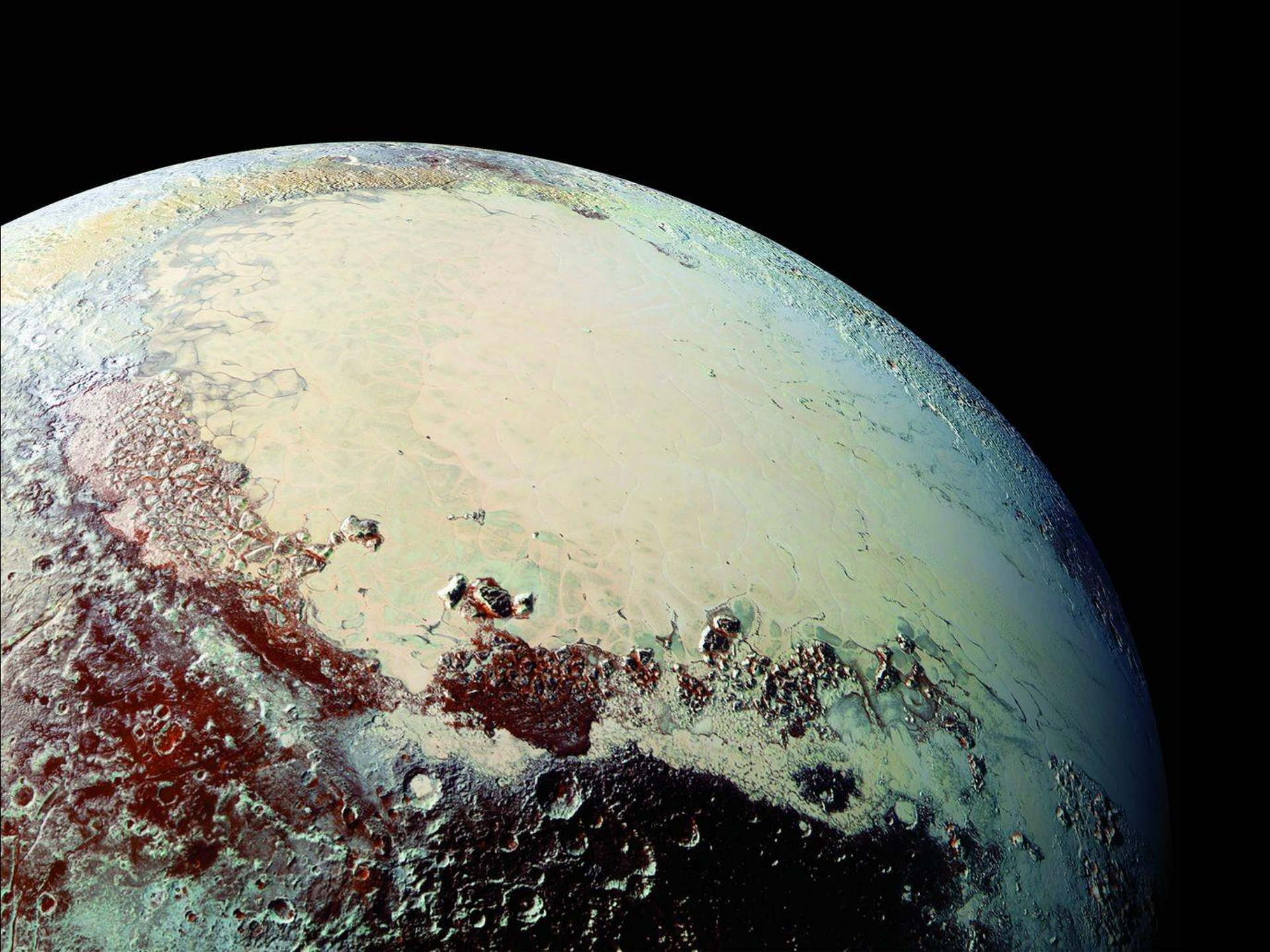
PLUTÃO



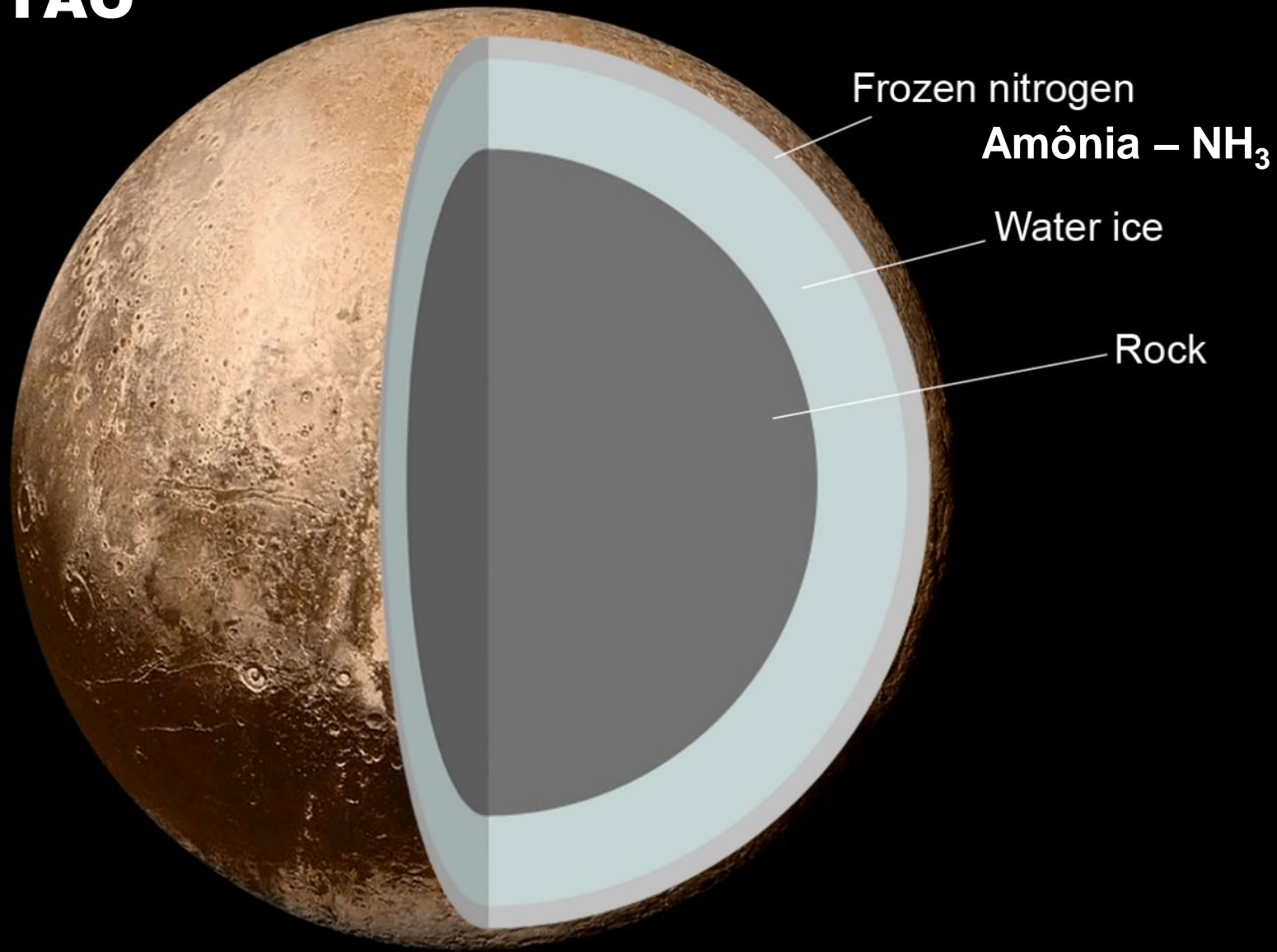
Foto tirada pela sonda New Horizons em 13 de Julho de 2015 quando estava a 768.000 km de Plutão.

Estrutura lisa “coração” mede ~ 1.600 km – processos geológicos em andamento?





PLUTÃO



Superfície de Plutão é 50% a 75% de rocha misturada com gelos (DENSIDADE ~ 2G/CM³)

DEFINIÇÃO DE PLANETA ANÃO **segundo a união astronômica internacional (IAU)**

Planeta anão é um corpo celeste situado dentro do sistema solar e que satisfaz 4 condições:

[1] orbitar ao redor do Sol

[2] tenha massa suficiente para assumir uma situação de equilíbrio hidrostático que o leve a ter forma arredondada.

[3] compartilhar sua órbita com outros corpos de massa semelhante (não são dominantes na sua órbita)

[4] não é um satélite

Numerosos pequenos corpos também habitam o sistema solar :

satélites dos planetas (luas)

- **asteroides (pequenos corpos rochosos)**
- **cometas (pequenos corpos de gelo e gases congelados)**
- **objetos congelados do cinturão de Kuiper (além da órbita de Netuno = objetos transnetunianos)**

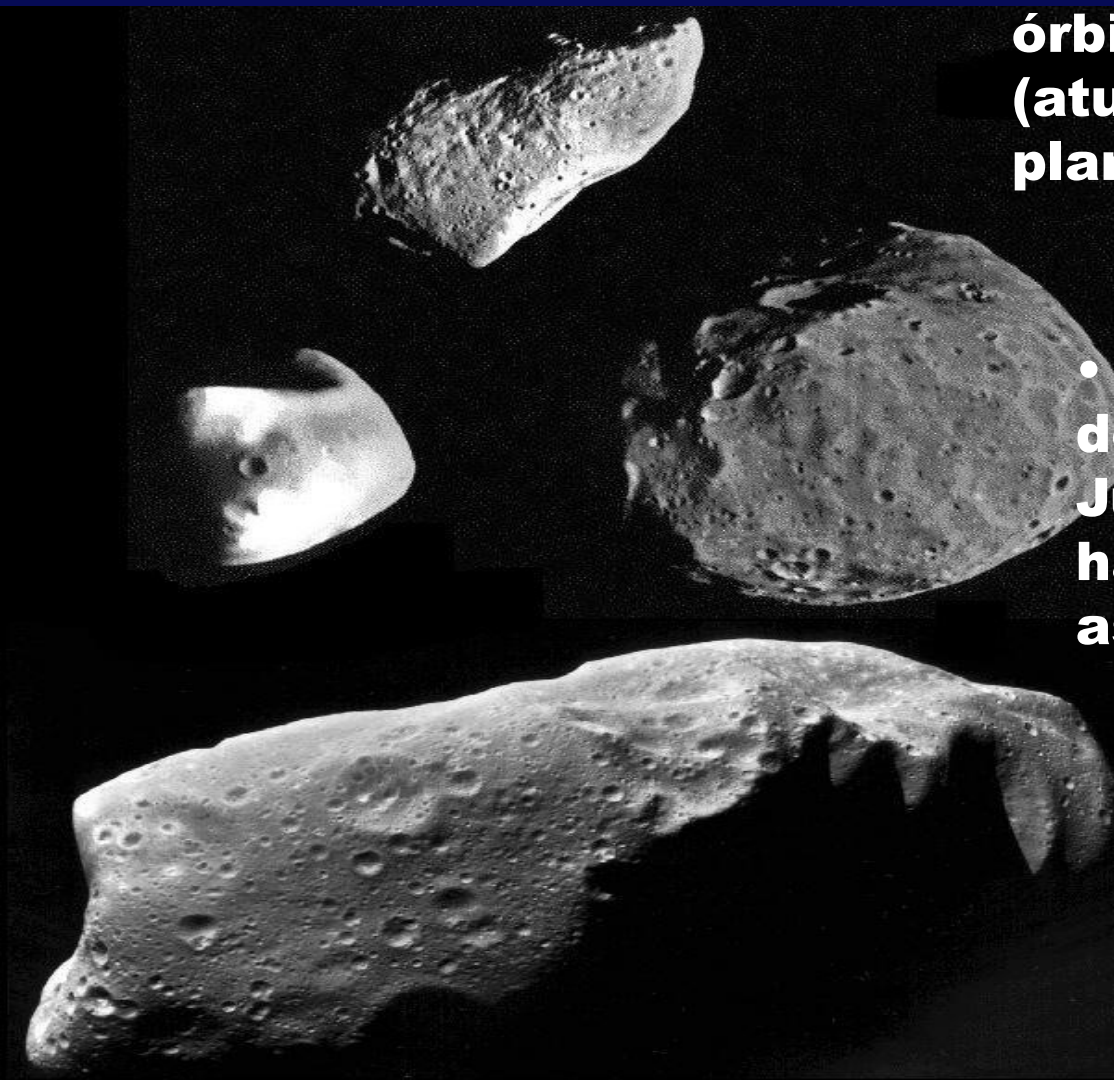
Com poucas exceções, os satélites planetários orbitam no mesmo sentido da órbita dos planetas em torno do Sol (anti-horário). Seu plano orbital é aproximadamente no plano da eclíptica.

Asteroides

- **Piazzi (1801) determinou a órbita do asteróide CERES (atualmente classificado de planeta anão).**

- **Em anos posteriores foram descobertos Pallas, Vesta e Juno. Final do século XIX havia algumas centenas de asteroides identificados**

- **Hoje : alguns milhares tem sido descobertos a cada ano, muitos são pequenos demais para serem vistos da Terra**



Asteroides

Tamanhos (diâmetro):

- 26 maiores do que 200 km
- os demais catalogados estão entre 200 e 100 km (99%)
 - metade entre 10 e 100 km estão catalogados
- poucos de 1 km são conhecidos (estima-se que a sua quantidade é da ordem de milhões)

• massa total de todos os asteroides reunidos não ultrapassa a massa da Lua.

Asteroides

Composição química:

- semelhante a solar (a menos de H, He e outros materiais mais voláteis) **75% dos asteroides conhecidos**
- mistura de níquel-ferro, magnésio e silicatos **17% dos asteroides conhecidos**
- níquel-ferro puro **o restante**

Posição no sistema solar

- **Cinturão principal = entre Marte e Júpiter (cerca de 2 - 4 UA do Sol)**
- **Próximos a Terra = cerca de 0,98 - 1,3 UA**
- **Troianos = próximos a Júpiter (algumas centenas)**

Cometas

Movimentam-se até as partes mais internas do sistema solar em órbitas bem alongadas e com qualquer inclinação em relação a eclíptica.



Cometas



- **Conhecidos desde a antiguidade**
 - ⇒ **notas sobre a passagem do Cometa Halley feitas pelos Chineses em 240 AC**
- **A partir de 1995, ~ 880 cometas foram catalogados e alguns tiveram suas órbitas calculadas: 184 são periódicos (períodos < 200 anos)**

**Composição química:
mistura de (água + gases) congelados + partículas de poeira**

Cometas

Hyakutake 1996

PARTES :

- **NÚCLEO** : região central, é formado por gases congelados, gelo e restos de rochas. Tamanho de aproximadamente uma montanha da Terra.

- ✓ Quando está bastante afastado do Sol, o cometa só possui o núcleo.

Cometas

Hyakutake 1996

- **COMA** : nuvem de gás aproximadamente esférica que circunda o núcleo. Esta nuvem é produzida quando o cometa se aproxima do Sol, e o calor começa a evaporar o material congelado.
 - ✓ É formada por vapor d'água, CO₂ e outros gases neutros que sublimaram a partir do núcleo sólido. Estes gases brilham bastante (luz solar refletida nas moléculas do gás).
 - ✓ Pode se estender até cerca de meio milhão de km a partir do núcleo.

Cometas

- **CAUDA** : é formada quando o núcleo começa a se desintegrar, produzindo uma trilha com material que é arrancado da sua superfície. Os cometas possuem duas caudas:

1) cauda de poeira : trilha de poeira arrancada do cometa que é deixada para trás a medida que ele se desloca (situa-se ao longo da sua trajetória orbital). Parte mais visível a olho nú.

2) Cauda de íons ou gás : aponta na direção contrária ao Sol (interação com o vento solar) .

As caudas podem se estender por milhões de km.



Hale-Bopp 1997

Cometas

Os gases presentes na coma são ionizados pelas partículas do vento solar (elétrons, prótons, partículas alfa). Partículas suficientemente energéticas colidem com o material do cometa ⇒ ionização ou excitação.

- O íon mais comum é o CO^+ , que espalha a luz azul melhor do que a vermelha, o que geralmente dá uma cor azulada à cauda de íons.***
- O vento solar atinge o cometa a uma velocidade de $\sim 500 \text{ km/s}$, fazendo com que a cauda ionizada seja direcionada na direção oposta ao Sol.***



COMETAS EXTINTOS E COMETAS ADORMECIDOS

Os cometas não possuem um material inesgotável para ser volatilizado. A cada aproximação do Sol, os cometas perdem material.

Cometa extinto: aquele que esgotou o material que pode ser volatilizado ⇒ o cometa não consegue mais formar a coma e o cauda .

Cometa adormecido: aquele que durante as suas viagens interplanetárias acumulou uma espessa crosta de grãos de poeira interestelar sobre a sua camada de material volátil ⇒ a radiação proveniente do Sol não consegue mais atingir e arrancar seu material volátil para formar a cauda e a coma.

COMETAS EXTINTOS E COMETAS ADORMECIDOS

Esta manta espessa de poeira acumulada sobre sua superfície volátil dá ao cometa uma **aparência externa de asteroide**, mas debaixo desta manta está o núcleo de um cometa. Acredita-se que o **"asteroide" Phaeton** (atingiu a Terra em 1908) possa ser um objeto deste tipo, um cometa extinto ou mesmo adormecido, que apresenta características de asteroide.



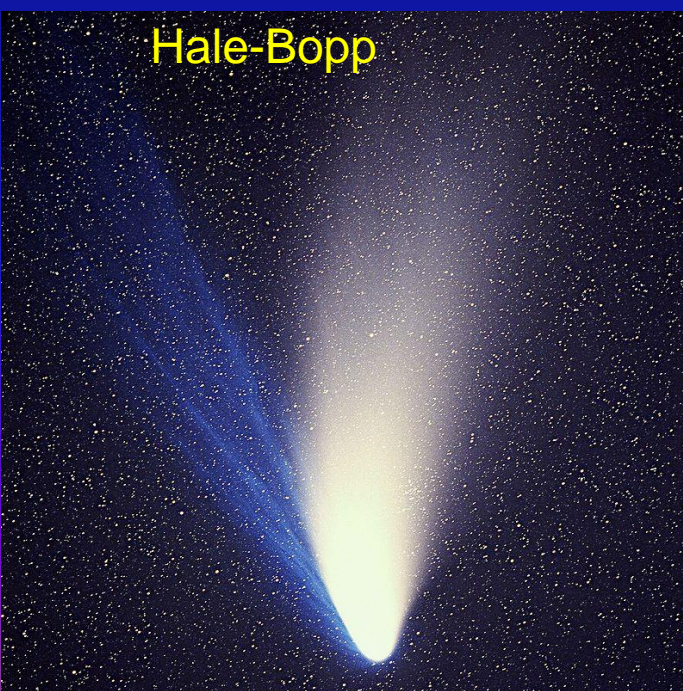
**Explosão de Tunguska (junho 1908)
10 a 20 Mtons (1000 vezes Hiroshima)**



Cometas

Alguns cometas	Data da descoberta	Última passagem (periélio)	Próxima passagem (periélio)	Período (anos)
Halley	240 A.C.	1986	2061	76,00
Encke	1786	2013	2017	3,28
Biela	1772	1852	rompeu-se	6,62
Faye	1843	2014	2021	7,55
Hale-Bopp	1995	1997	4385	2391 (Oort)

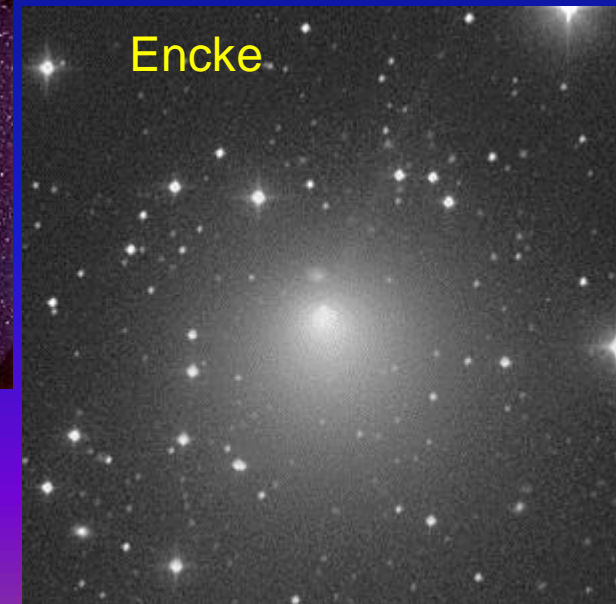
Hale-Bopp



Halley



Encke



Cometas

Alguns cometas	Data da descoberta	Última passagem (periélio)	Próxima passagem (periélio)	Período (anos)
Halley	240 A.C.	1986	2061	76,00
Encke	1786	2013	2017	3,28
Biela	1772	1852	rompeu-se	6,62
Faye	1843	2014	2021	7,55
Hale-Bopp	1995	1997	4385	2391



FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

Contração Nebular

Primeiro modelo de contração nebular René Descartes (século XVII)

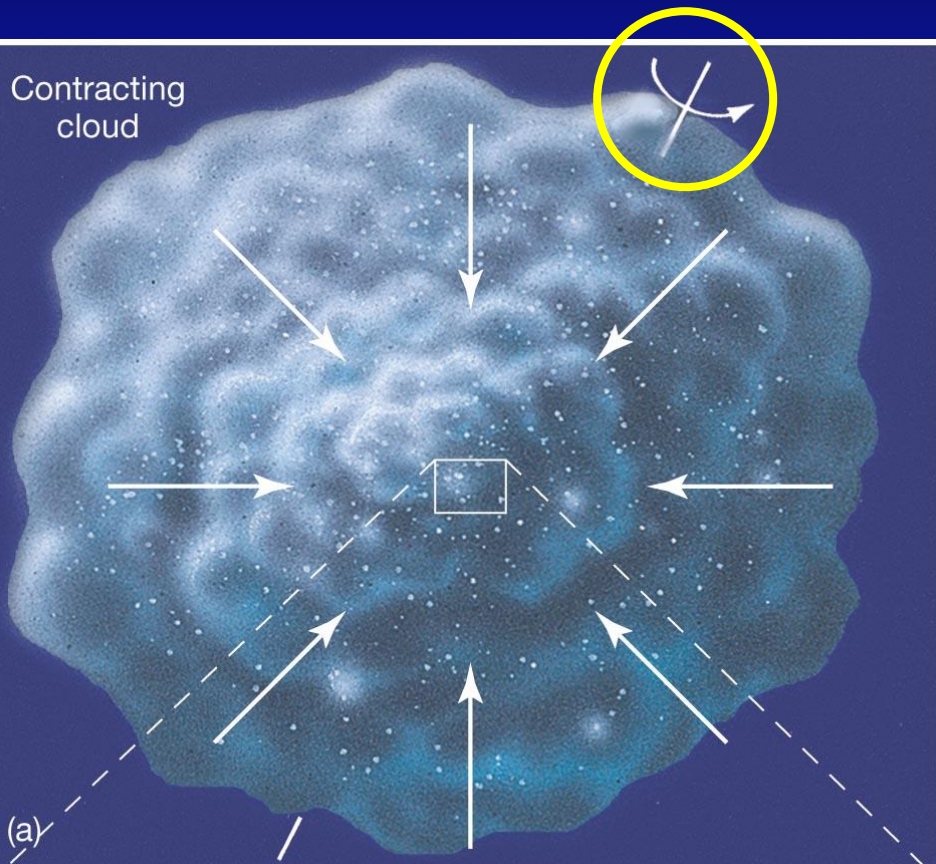
Nuvem grande de gás e poeira começa a se contrair sob a influência de sua própria gravidade ⇒ fica + densa e mais quente e eventualmente forma uma estrela

Enquanto o Sol se forma no centro mais quente e denso da nuvem, os planetas se formam nas regiões mais externas e frias ⇒ **planetas são subprodutos da formação de estrelas.**

FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

Contração Nebular

Laplace (1796) \Rightarrow demonstração qualitativa do colapso de uma nuvem de gás que gira (formato do sistema solar)



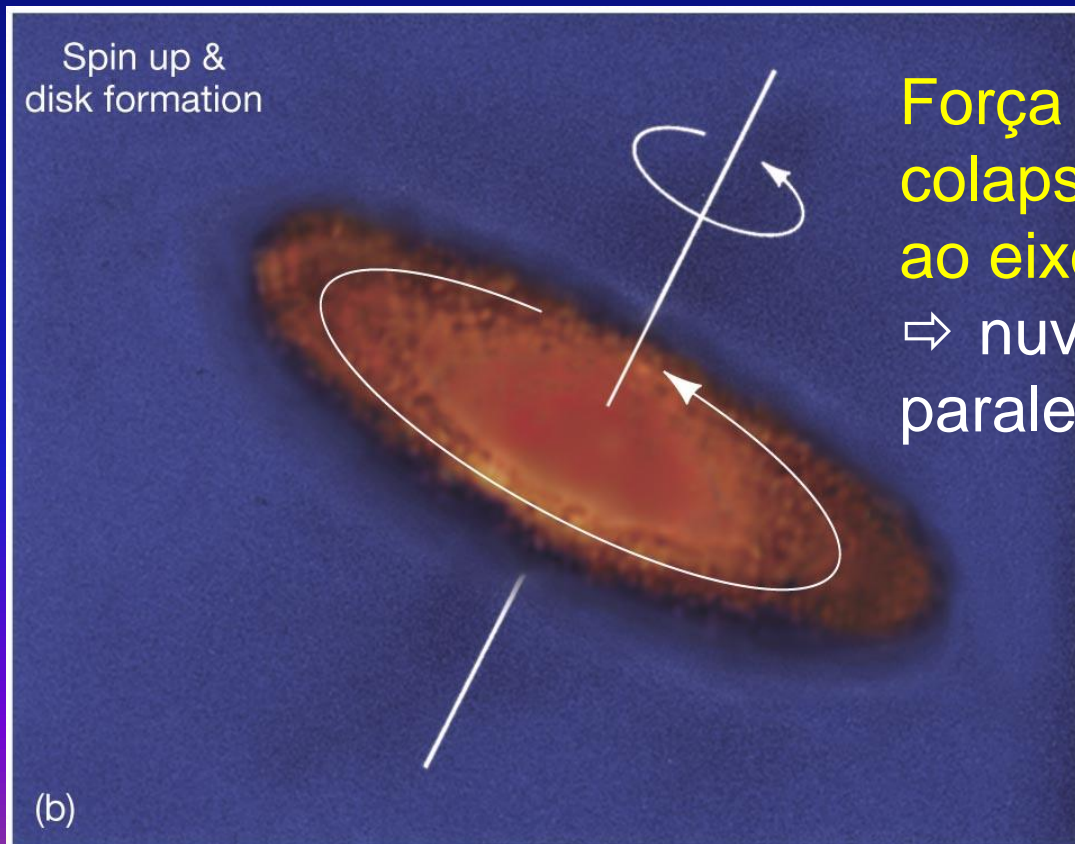
Quanto mais uma nuvem interestelar se contrai, mais rápido ela gira

conservação de momentum angular $L = m \cdot v \times r$

FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

Contração Nebular

Laplace (1796) ⇒ demonstração qualitativa



Força centrífuga se opõe ao colapso na região perpendicular ao eixo de rotação.

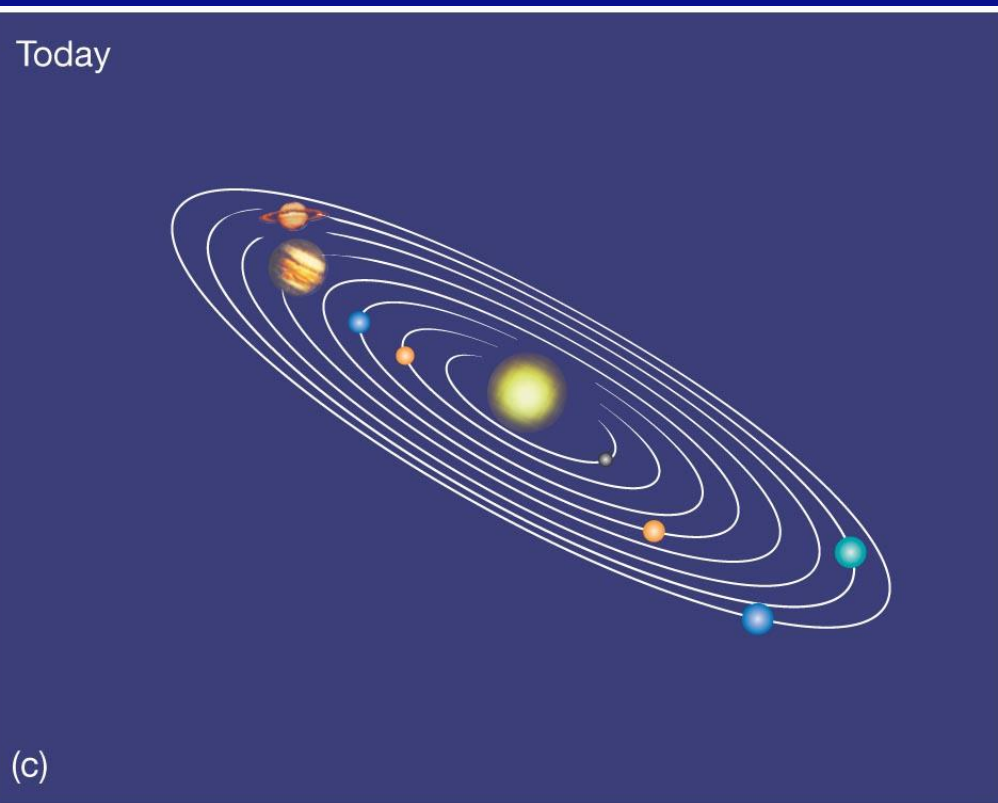
⇒ nuvem colapsa + rapidamente paralelamente ao eixo de rotação

PANQUECA

FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

Contração Nebular

Laplace (1796) ⇒ demonstração qualitativa

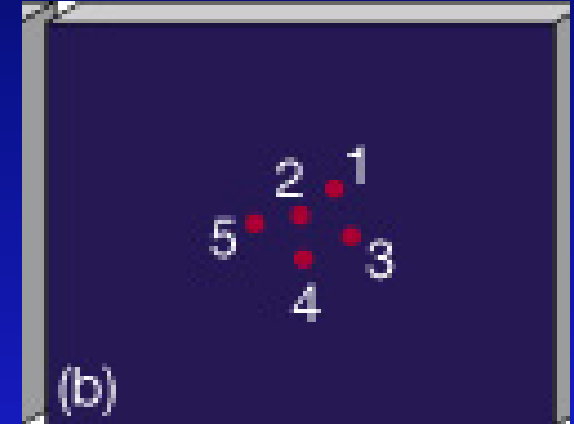
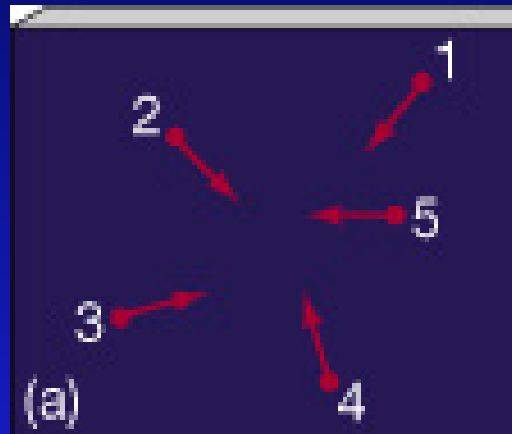
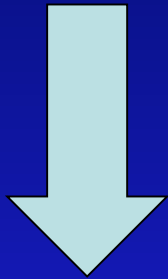


FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

TEORIA NEBULAR

FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

Mas... Disco de gás quente NÃO forma conjuntos de nuvens que eventualmente formarão planetas



O gás quente tende a se dispersar e não se aglomerar!



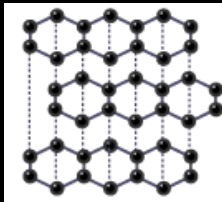
Teoria da Condensação

INGREDIENTE CHAVE: PRESENÇA DE POEIRA INTERESTELAR

POEIRA = grãos (aglomerados de moléculas) formados por:

- Carbonáceos

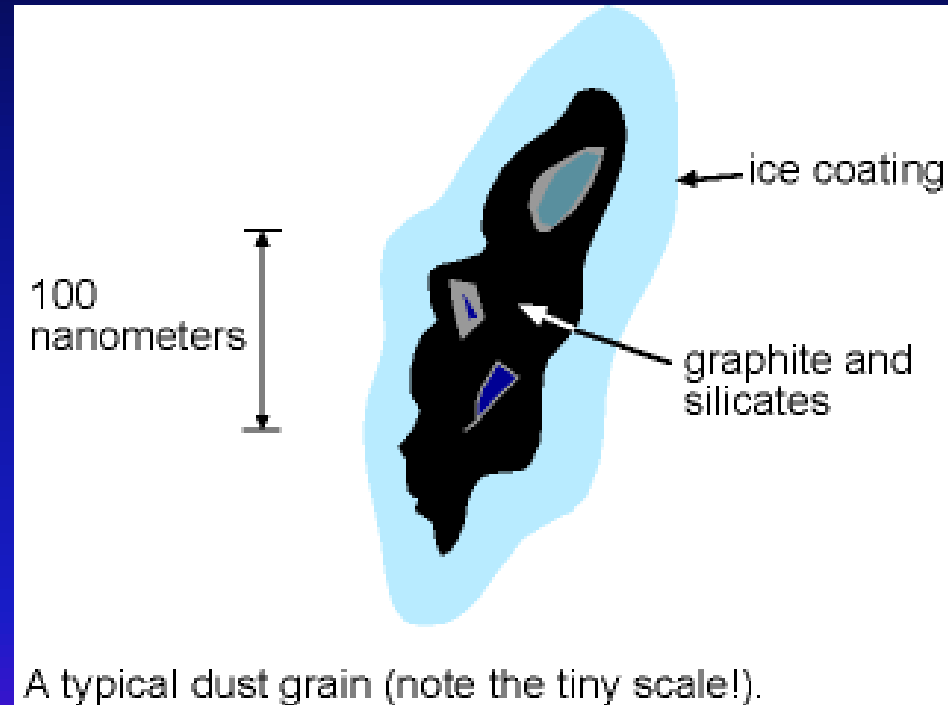
Ex. grafite



- Silicatos

Ex. Olivina $(\text{Mg}^{2+}, \text{Fe}^{2+})_2\text{SiO}_4$

COBERTOS COM GELO



Teoria da Condensação

a) Resfriamento do gás quente através da presença de metais no gás: irradia o calor através de emissão de radiação no IR



Colisão de H ou elétrons com íons e átomos neutros mais pesados:

- energia cinética \Rightarrow elétron vai para um nível de maior energia
- elétron volta para um nível de menor energia [desexcitação]
 \Rightarrow emissão de fótons no IR

T cinética do gás baixa

Ex. Resfriamento de uma nuvem HI (H neutro)

Ion/Espectro	Transição	colisionador	$\Delta E/k$	$\lambda(\mu\text{m})$
C ⁺ /[CII]	$^2P_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$	H ₂ , H	92K	158
O ⁰ /[OI]	$^3P_1 \rightarrow ^3P_2$	H	228K	63,2
	$^3P_0 \rightarrow ^2P_1$		99K	146

Radiação emitida por transições proibidas (~~regras de seleção~~) são menos prováveis de serem reabsorvidas

Teoria da Condensação

INGREDIENTE CHAVE: PRESENÇA DE POEIRA INTERESTELAR

b) Resfriamento ⇒ diminui pressão interna ⇒ facilita colapso da nuvem

c) Um número maior de moléculas podem se agrupar através de núcleos de condensação formados pela poeira

⇒ como gotas de chuva que se formam na atmosfera da Terra: poeira e fuligem atuam como núcleos de condensação ao redor dos quais moléculas de água podem se aglomerar.



Grãos de poeira formam núcleos de condensação ao redor do quais outras moléculas começam a se aglomerar (**efeito bola de neve**)

FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

(a) Uma nuvem de gás rotante começa a se contrair devido a sua própria massa \Rightarrow colapso gravitacional.

(b) Quanto mais uma nuvem interestelar se contrai, mais rápido ela gira \Rightarrow conservação de momentum angular $L = m \cdot v \times r \Rightarrow$ DISCO.

(c) Grãos de poeira atuam como núcleos de condensação: através de colisões, moléculas se aderem aos grãos e formam pequenos corpos chamados “planetesimais” (tamanho da Lua).

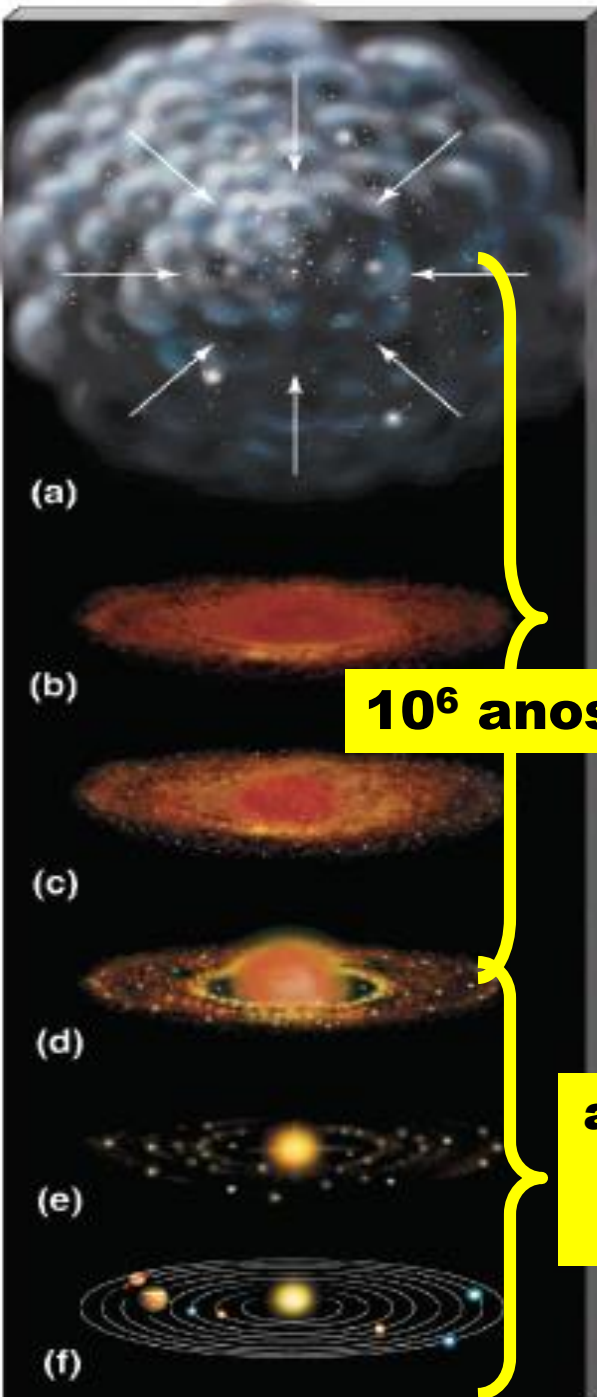
(d) A sequência das colisões forma corpos cada vez maiores \Rightarrow aglutinação de pequenos corpos que colidem. No centro forma-se o PROTOSOL.

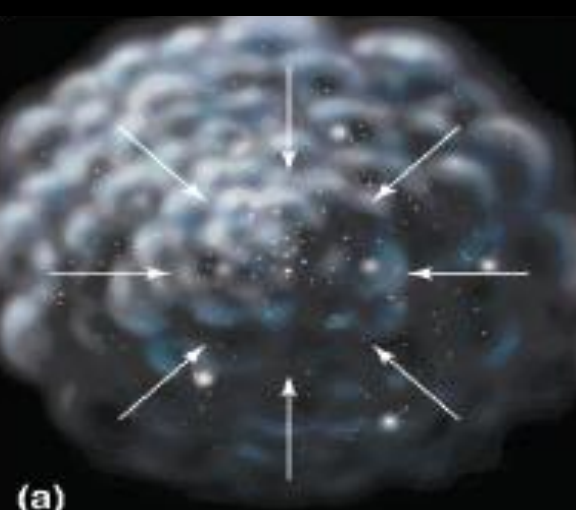
(e) A ignição termonuclear do Sol (torna-se uma estrela) aquece o disco, fazendo com que os corpos + próximos, menores e + voláteis evaporem

(f) O sistema solar é formado com a configuração que é observada atualmente

10⁶ anos

**alguns
10⁶
anos**





Idade do sistema solar = $4,5 \times 10^9$ anos

(a)

Sucesso do modelo contração+condensação:

(b)

• as órbitas dos planetas e satélites seguem a rotação original da mesma nuvem de gás e poeira que os formou.

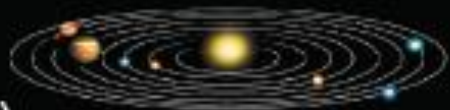
(c)

• as órbitas dos planetas estão ~ no mesmo plano (formação do disco)

(d)

(e)

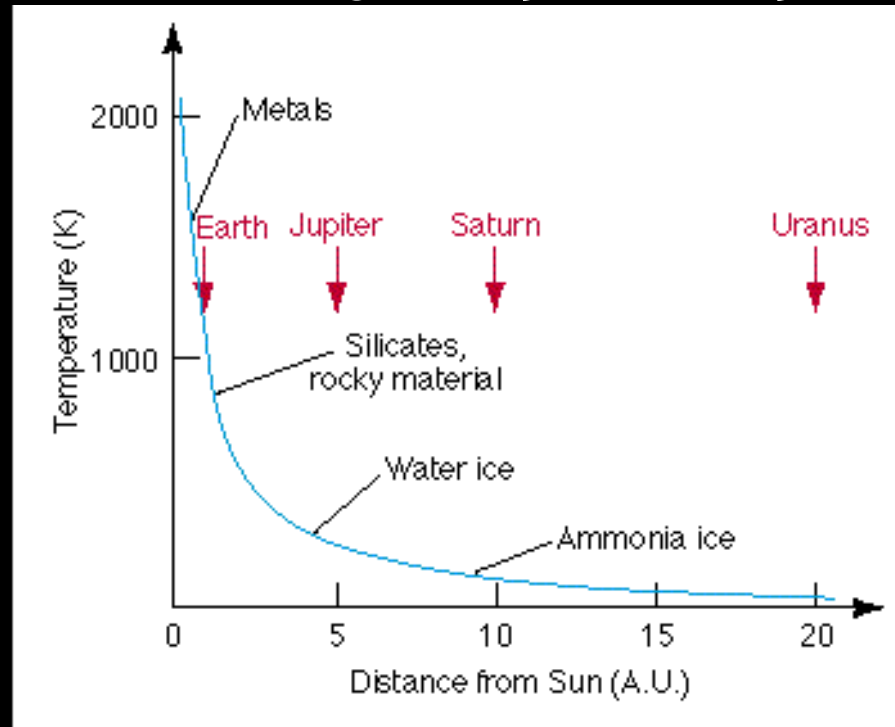
(f)



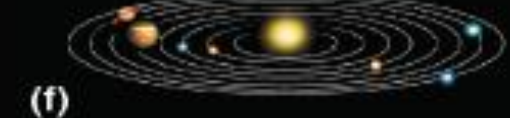
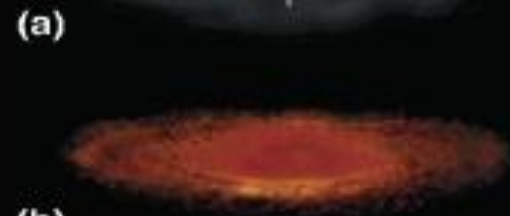
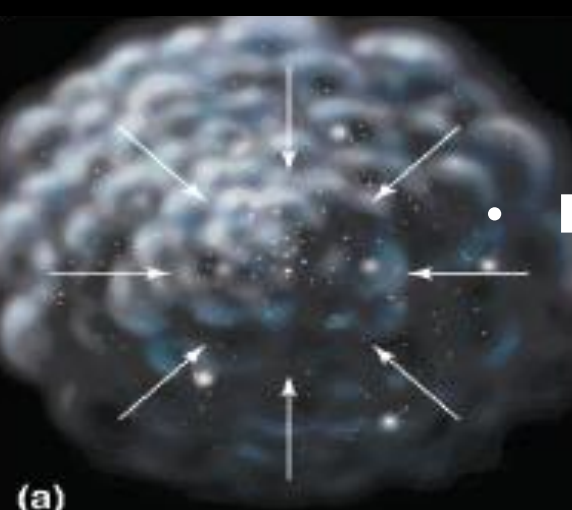
Sucesso do modelo contração+condensação:

• Explicação da configuração do sistema solar

Temperatura no sistema solar primitivo antes da aglutinação começar



Distância menor \Rightarrow T maior: somente metais podem se condensar para formar grãos.
Distância maior \Rightarrow T menor: podem se formar grãos de gelo, amônia e materiais mais voláteis



Resumindo:

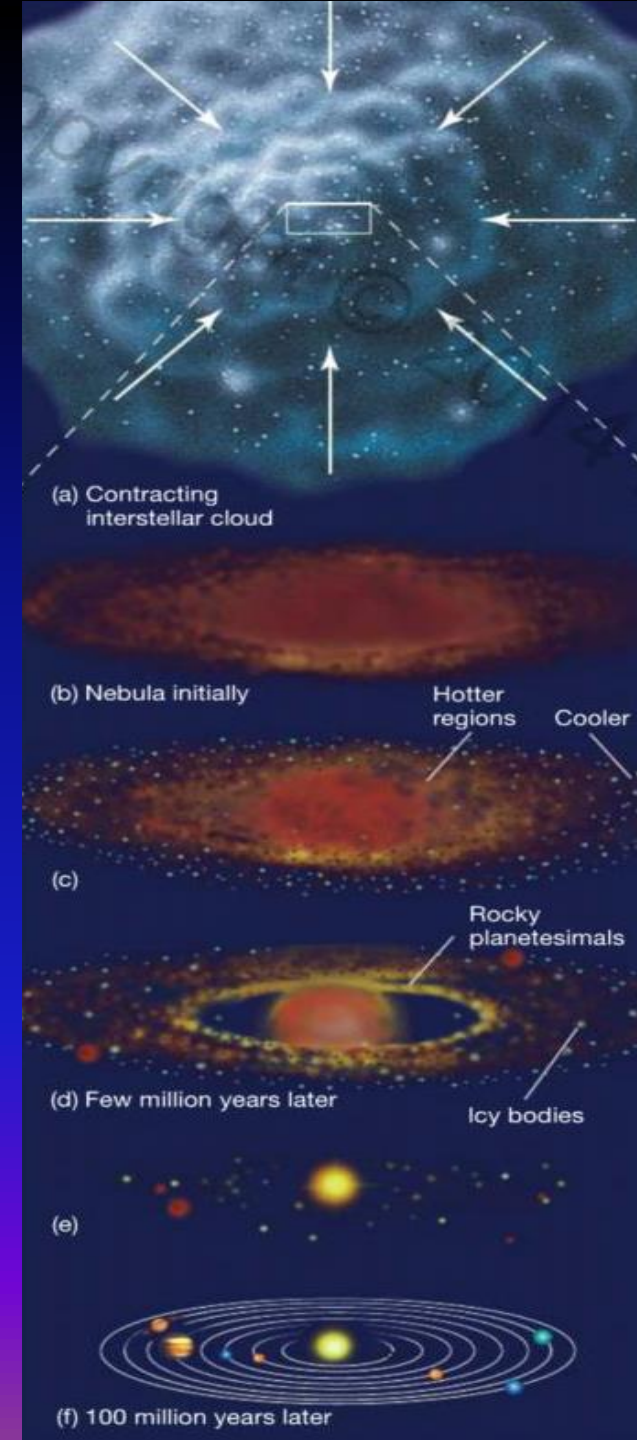
**TEORIA DA CONTRAÇÃO NEBULAR
+
TEORIA DA CONDENSAÇÃO**

Explicam as características do nosso sistema solar:

Órbitas dos planetas principais:

- 1. ~ circulares**
- 2. ~ no mesmo plano**
- 3. na mesma direção da rotação do Sol em torno do seu próprio eixo**

Consequência do formato e rotação da nuvem mãe.



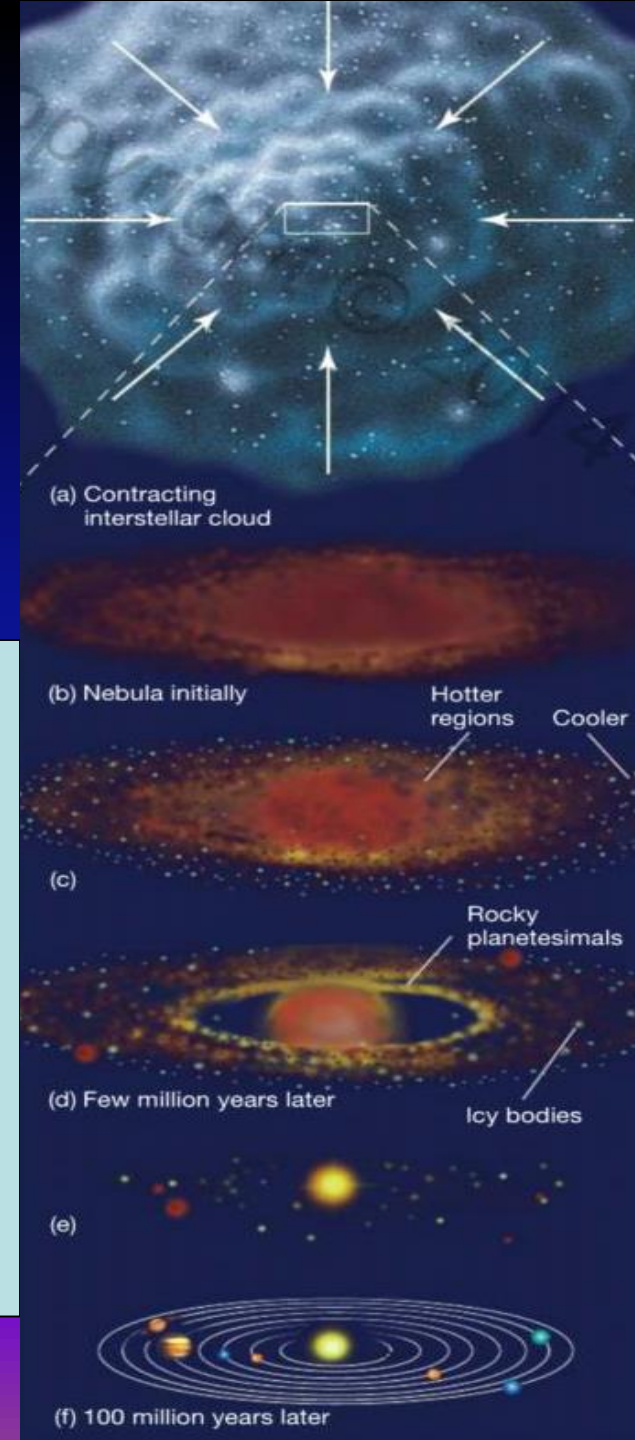
Resumindo:

**TEORIA DA CONTRAÇÃO NEBULAR
+
TEORIA DA CONDENSAÇÃO**

Explicam as características do nosso sistema solar:

Crescimento dos protoplanetas através da aglomeração de matéria e posterior aquecimento da nebulosa quando o Sol se torna uma estrela:

- 1. Planetas se encontram largamente espaçados**
- 2. Debris da fase de acreção + fragmentação: asteróides, o cinturão de Kuiper e Nuvem de Oort.**



Mas...

**TEORIA DA CONTRAÇÃO NEBULAR
+
TEORIA DA CONDENSAÇÃO**

Teorias são flexíveis no que diz respeito a detalhes:

Exemplos:

TEORIA NEBULAR: não necessariamente os planetas devem todos rotar em torno de seu próprio eixo no mesmo sentido.

TEORIA DA CONDENSAÇÃO: encontros randômicos combinam os planetesimais em protoplanetas.

Algumas características do sistema solar que podem ser modeladas por eventos randômicos:

- ❖ 1 ou 2 protoplanetas podem ter colidido com Vênus na época de sua formação, dando origem à sua rotação muito lenta e retrógrada.
- ❖ o sistema Terra-Lua pode ter surgido da colisão entre a protoTerra e um objeto da ordem do tamanho de Marte.
- ❖ o eixo de rotação de Urano pode ter sido causado por colisões de dois ou mais protoplanetas na época da sua formação.
- ❖ a lua de Urano Miranda pode ter sido parcialmente destruída por uma colisão com um planetesimal .
- ❖ interações entre os planetas jovianos e um ou mais planetesimais podem explicar algumas irregularidades nas luas destes planetas (movimento retrógrado de Triton (lua de Netuno)).

